

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Vybraná spektrofotometrická měření**

**Selected spectrophotometric measurements**

**2010**

**Bc. Jan Maňák**

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne .....

.....

Bc. Jan Maňák

## **Poděkování:**

Rád bych touto cestou chtěl vyjádřit vřelé poděkování vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Ing. Karlu Sokanskému, CSc. za odborné vedení a cenné připomínky.

## Abstrakt

Cílem této diplomové práce „Vybraná spektrofotometrická měření“ bylo zhodnotit možnosti měření elektrického světla v laboratořích světelné techniky, popsat vlastnosti a měřicí schopnosti spektrofotometrických přístrojů, dále popsat teorii vnímání barev a samotného měření indexu podání barev, popsat návrh a výrobu kulového integrátoru, uvést ukázkou praktického měření několika různých světelných zdrojů a svítidel za použití kulového integrátoru a měřicích přístrojů a nakonec vytvoření ukázkové laboratorní úlohy. Zvlášť důležitým bodem bylo vytvoření kulového integrátoru, který dále bude sloužit nejen jako vyučovací pomůcka, ale rovněž i jako další rozšíření možností laboratoře na VŠB-TU Ostrava. Snahou do budoucna je vytvořit podmínky pro měření světelných zdrojů a svítidel, jejichž rozměry se stále zmenšují, a jejich světelný výkon stoupá.

Klíčová slova: světelný tok, index podání barev, teplota chromatičnosti, kolorimetrický trojúhelník, světelné zdroje, spektrofotometrie, kosinův nástavec, kulový integrátor.

## Abstract

The aim of this thesis which is named „Selected spectrophotometric measurements“ was not only to evaluate possibilities of measurements of electric light in light equipment laboratories but also to describe features and measuring abilities of spectrophotometric instruments. Furthermore, to describe the theory of light perception and the theory of measurements of colour rendition index, to describe the project and processing of the integrating sphere, to give an example of practical measurements of several given light sources and lighting units with using the integrating sphere and measuring instruments and, eventually, to create a demonstration laboratory exercise. The most important part was the creation of the integrating sphere which will serve not only as a teaching aid, but also as further widening of possibilities of the laboratory at Mining University in Ostrava. The effort for the future is to satisfy the requirements for measuring light sources and lighting units, the proportions of which gradually minimize and the power of which gradually increase.

Key words: luminous flux, colour rendering index, chromaticity temperature, calorimetric triangle, light sources, spectrophotometry, cosine corrector, integrating sphere

## Seznam použitých symbolů

$E$	[lx]	osvětlenost
$T_c$	[K]	náhradní teplota chromatičnosti
$L$	[cd.m <sup>-2</sup> ]	jas
$f$	[Hz]	frekvence
$A$	[J]	energie vydaná teplem
$M$	[W.m <sup>-3</sup> ]	spektrální intenzita vyzařování
$c$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost světla ve vakuu
$\varepsilon_\lambda$	[-]	emisivita teplotního zářiče
$K$	[-]	kontrast jasů
$\nu$	[Hz]	kmítočet emitovaného fotonu
$\nu_0$	[Hz]	kmítočet budoucího fotonu
$\Phi_{e\lambda}$	[W.m <sup>-1</sup> ]	poměrná spektrální hustota zářivého toku
$\Phi$	[lm]	celkový světelný tok svítidla
$\Phi_\rho$	[lm]	odražený světelný tok
$\Phi_N$	[lm]	světelný tok normálového zdroje
$\Phi_Z$	[lm]	světelný tok měřeného zdroje
$\Phi_e$	[W]	zářivý tok
$\lambda$	[nm]	vlnová délka
$t$	[s]	čas
$D$	[m]	průměr koule
$k_i$	[-]	konstanta kulového integrátoru
$\check{c}(\lambda), z(\lambda), m(\lambda)$	[-]	kolorimetrické koeficienty
$x, y, z$	[-]	trichromatické souřadnice pro normálního pozorovatele
$X, Y, Z, U, V, W$	[-]	trichromatické složky
$X_n, Y_n, Z_n$	[-]	trichromatické hodnoty referenční barvy
$u, v$	[-]	souřadnice kolorimetrického diagramu
$L^*$	[-]	světlost barvy
$a^*, b^*$	[-]	chromatické souřadnice
$C^*_{ab}$	[-]	sytost
$h^\circ_{ab}$	[°]	barevný tón
$\Delta E^*_{ab}$	[-]	rozdíl barev, barevná odchylka
$R_i$	[-]	specifický index podání barev
$R_a$	[-]	všeobecný index podání barev

## Seznam použitých zkratk

CIE	mezinárodní komise pro osvětlování
CIELAB	barevný prostor CIE $L^*a^*b^*$
LED	světelná dioda
UV	ultrafialové záření
tzn.	to znamená
tzv.	tak zvaně
např.	například
resp.	respektive
popř.	popřípadě
apod.	a podobně
aj.	a jiné
ČSN	Česká státní norma
č.	číslo
Tab.	tabulka
obr.	obrázek

# Obsah

<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Teorie světelných zdrojů .....</b>	<b>2</b>
1.1 Teorie světelného vyzařování .....	2
1.1.1 Inkandescence.....	3
1.1.2 Luminescence .....	4
1.1.3 Výboj .....	5
1.1.4 Emise fotonů při průchodu elektronů PN přechodu .....	6
1.1.4.1 Komplementární vlnové délky.....	7
1.1.4.2 Konvertor vlnových délek .....	7
1.2 Žárovky .....	9
1.3 Zářivky .....	10
1.4 Výbojky.....	11
1.5 Světelné diody (LED) .....	12
1.5.1 Výkonové LED .....	13
<b>2 Spektrofotometrie a její využití ve světelné technice.....</b>	<b>16</b>
2.1 Fotometrie v chemii, v materiálovém inženýrství a ve výzkumu textilií.....	16
2.2 Spektrofotometrie ve světelné technice .....	17
2.3 Spektrofotometrická měření ve světelných laboratořích.....	19
2.3.1 Měření spektrálních charakteristik .....	19
2.3.2 Měření kolorimetrického troj., teploty chromatičnosti a světelných veličin .....	20
2.4 Způsoby měření barev .....	21
<b>3 Spektrofotometry firem Avantes a JeTi, kalibrace .....</b>	<b>22</b>
3.1 Spektrofotometr AvaSpec-2048 firmy Avantes.....	22
3.2 Spektrofotometr firmy Specbos 1211 od firmy Jeti .....	24
<b>4 Výpočet a měření indexu podání barev <math>R_a</math>.....</b>	<b>25</b>
4.1 Barevný vjem a podnět .....	25
4.2 Trichromatické soustavy .....	27
4.3 Barevný prostor CIE 1976 ( $L^*a^*b^*$ ) .....	32
4.4 Další způsoby barevné specifikace.....	35

4.5	Podání barev .....	37
4.6	Měření indexu podání barev .....	40
4.6.1	Měření v systému $L^*a^*b^*$ .....	40
4.6.2	Měření „CRI“ .....	40
<b>5</b>	<b>Ulbrichtova koule (kulový integrátor) .....</b>	<b>42</b>
5.1	Měření v Kulovém integrátoru.....	42
5.2	Návrh a výroba kulového integrátoru o průměru 40cm.....	46
<b>6</b>	<b>Měření vybraných spektrálních vlastností světelných zdrojů v laboratořích VŠB TU Ostrava.....</b>	<b>51</b>
6.1	Měření světelného toku .....	51
6.2	Měření spektrálních charakteristik .....	53
6.3	Měření indexu podání barev, teploty chromatičnosti a kolorimetrického troj.....	55
<b>7</b>	<b>Návrh laboratorní úlohy na měření vybraných spektrofotometrických vlastností světelných zdrojů.....</b>	<b>57</b>
7.1	Zadání úlohy .....	57
7.2	Teoretický rozbor .....	57
7.2.1	Měření světelného toku .....	59
7.2.2	Měření spektrálních charakteristik .....	59
7.2.3	Měření indexu podání barev, teploty chromatičnosti a kolorimetrického troj.....	60
7.3	Zpracování a vyhodnocení .....	60
	<b>Závěr .....</b>	<b>61</b>
	<b>Seznam literatury .....</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>64</b>



## Úvod

K budoucnosti odvětví světelné techniky patří světlo emitující diody, což vyplývá ze zatím zveřejněných měření a trendů dnešní doby. Světelné diody, technicky a přesněji LED, by tedy mohly být světelnými zdroji budoucnosti. Avšak jejich vývoj, konstrukce a měření jsou problematické a spojené právě se specifiky, které LED charakterizují a reprezentují, tedy rozměry, barva, účinnost, chlazení apod.

V oblasti měření takto poměrně malých zdrojů a hlavně na svůj rozměr výkonných svítidel, je zapotřebí použití standardních měřících přístrojů a konstrukcí s netradiční úpravou. Jedním z takových konstrukcí je i kulový integrátor.

Kulový integrátor, který bývá též nazýván Ulbrichtova koule, je zařízení tvaru koule, jehož rozměry musí korespondovat s vlastnostmi světelných zdrojů v tomto zařízení měřených. Pokud tedy laboratoř nedisponuje vhodnou konstrukcí k měření, je zapotřebí takovou konstrukci navrhnout a vyrobit.

Cílem této práce je úvod do problematiky světelných zdrojů a poukázat na jejich dělení. Zhodnotit přístroje, kterými lze efektivně vybrané spektrofotometrické vlastnosti měřit. Dále navrhnout a vytvořit konstrukci kulového integrátoru a provést na ní měření předložených světelných zdrojů a svítidel. Nakonec vytvořit laboratorní úlohu pro měření vybraných spektrofotometrických vlastností.

# 1 Teorie světelných zdrojů

Modernizace v technice se podepisuje i na vývoji nových světelných zdrojů a svítidel, na využívání čerstvých poznatků vyzařování, úrovní energií, účinností, a samozřejmě uplatňování zdokonalených produktů a ze strany odborníků na světelnou techniku a hygieniků hlavně zdokonalování osvětlování v širším slova smyslu.

## 1.1 Teorie světelného vyzařování

Světlo je elektromagnetické záření, které je schopno prostřednictvím zrakového orgánu vzbudit zrakový vjem. Záření lze charakterizovat frekvencí anebo vlnovou délkou. Vlnové délky viditelného záření se nacházejí v rozmezí  $\lambda = 380 \div 780$  nm. S viditelným zářením (světlem) sousedí ultrafialové záření na straně kratších vlnových délek a infračervené záření na straně delších vlnových délek. Ke vzniku světla v současných elektrických světelných zdrojích dochází na těchto čtyřech základních principech: [2]

- Inkandescence
- Luminescence
- Výboj
- Emise fotonů při průchodu elektronů PN přechodů

Těmito způsoby se tedy generuje světlo. U některých světelných zdrojů pouze jedním z uvedených, u vybraných pak kombinací těchto možností. V praxi se poté dává nejružnější důraz na zdroje dle způsobu vyzařování. Protože některé způsoby vyzařování mají svá pozitiva např. v účinnosti, či v indexu podání barev, avšak nevyhovují v odběru, či ve zpětné vazbě na síť a naopak. Proto se mnohdy světelné zdroje, a samozřejmě svítidla, v praxi kombinují.

### 1.1.1 Inkadescence

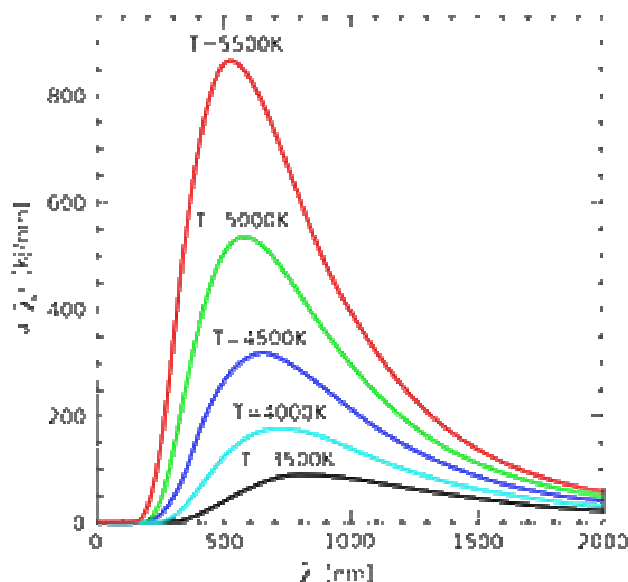
Vyzařování inkadescencí vychází z teorie o barvě zahřátého ideálně černého tělesa. Všechna tělesa ohřátá na teplotu vyšší než absolutní nula vysílají svými povrchy do okolí záření (tepelné). Dodávanou energií je zde energie tepelná a látkou je zde např. wolframové vlákno. Základním zákonem teplotního záření je Planckův zákon, který vyjadřuje závislost spektrální intenzity vyzařování černého zářiče na teplotě a na vlnové délce. [1]

$$M_{e\lambda} = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1} \quad (1.1)$$

Kde M je spektrální intenzita vyzařování a konstanty:

$$c_1 = 2\pi \cdot h \cdot c_2 = 3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \quad (1.2)$$

$$c_2 = \frac{h \cdot c}{k} = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (1.3)$$



Obrázek 1: Spektrální intenzita vyzařování černého tělesa [14]

Na obr. 1 je graficky vynesena spektrální intenzita vyzařování v závislosti na vlnové délce  $\lambda$  pro různé teploty z povrchu absolutně černého tělesa o velikosti  $1 \text{ cm}^2$ .

Spektrální intenzita vyzařování povrchu skutečného tělesa  $M'_{\epsilon\lambda}$  bude vždy menší než spektrální intenzita vyzařování absolutně černého tělesa  $M_{\epsilon\lambda}$ . Podíl těchto intenzit se nazývá spektrální intenzitou a je dán vztahem

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{M'_{\epsilon\lambda}}{M_{\epsilon\lambda}} \quad (1.4)$$

Což je emisivita teplotního zářiče. Teplotní zářič, jehož spektrální emisivita je v uvažovaném oboru spektra nezávislá na vlnové délce se nazývá neselektivním zářičem. Tento může být buď černý (pohlcuje veškeré dopadající záření) nebo šedý zářič (pohlcuje jen část dopadajícího záření). Selektivní zářič má spektrální emisivitu závislou na vlnové délce v uvažovaném oboru.

Teplotní zdroje (zářiče) by měly mít velkou emisivitu v oboru vlnových délek viditelného světla a malou emisivitu v ostatních částech spektra. Tuto podmínku splňuje zatím nejlépe wolframové vlákno svinuté do šroubovice. [1]

### 1.1.2 Luminescence

Luminescence je jev, při kterém se z atomů, molekul popřípadě krystalů látky uvolňují kvanta optického záření (fotony). K uvolňování fotonů dochází po předchozí absorpci energie, čímž se atom, molekula či krystal dostane do vybuzeného stavu. Podle způsobu buzení se dělí na tři typy.

- Fotoluminescence
- Elektroluminescence
- Radioluminescence

U fotoluminescence se buzení provádí pomocí fotonů, popřípadě záření X a paprsky  $\gamma$ . Fotoluminescence se dále dělí na fosforescenci a fluorescenci. Fluorescenční záření trvá pouze

během buzení, kdežto fosforeční materiál má určitý dosvit, který může trvat i několik hodin. To znamená, že od doby vybuzení do doby uvolnění fotonu může uběhnout několik hodin.

U elektroluminiscence je vybuzení vyvoláno elektrickým polem a na tomto principu jsou založeny svítící kondenzátory.

U radioluminiscence dochází k vybuzení pomocí nukleárního záření a radioluminiscenční zdroje mají specificky vynesenu oblast použití.

Nejvíce se ve světelné technice používá fluorescenční typ fotoluminiscence, kde vlnová délka emitovaného záření je určena Stokesovým pravidlem.

$$h \cdot \nu_0 = h \cdot \nu + A \quad (1.5)$$

Ze vztahu (1.5) vyplývá, že ( $\nu < \nu_0$ ) neboli ( $\lambda > \lambda_0$ ), což jsou vlnové délky emitovaného a budícího záření. Dle Stokesova pravidla lze transformovat pouze vlnové délky kratší na delší (např. z UV na viditelné). [1]

### 1.1.3 Výboj

U výbojových světelných zdrojů vzniká světlo hořením oblouku v plynech různých prvků. Druh el. výboje je závislý na druhu plynu, na jeho provozním tlaku, na přítomnosti prvotních elektronů, dále pak na parametrech napájecího obvodu a také na dějích probíhajících na katodě.

Obloukový výboj vzniká při proudovém zatížení katody až do  $10^3 \text{ A.cm}^{-2}$  a je provázen nízkým katodovým úbytkem, který činí 10 až 20 V. Provozní tlak se pohybuje v širokém rozmezí až do  $1,3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ . Samostatnost obloukového výboje je způsobena dostatečným zahřáním katody velkou proudovou hustotou a termoemise stačí k udržení výboje.

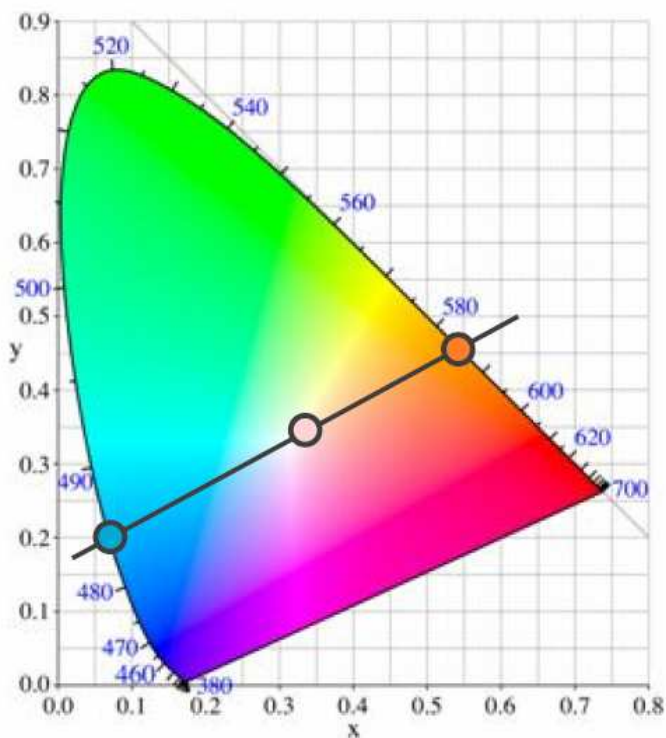
V osvětlovací technice se využívá dvou typů obloukového výboje, a to oblouk nízkotlaký (zářivky) a vysokotlaký (sodíková vysokotlaká výbojka). Rozdíl je v proudové

hustotě sloupce oblouku, která je u vysokotlakého oblouku vyšší a dále v rozložení rychlosti elektronů a plynu (molekuly ionty a atomy). Nízkotlaký obloukový výboj produkuje monochromatické (rezonanční) záření a to pro rtuťové páry a sodíkové páry. Vysokotlaký obloukový výboj je charakteristický menším podílem rezonančního záření, spektrum výboje se stává po částech spojitým. [1]

#### 1.1.4 Emise fotonů při průchodu elektronů PN přechodů

Světlo je vnímáno jako bílé, jestliže jsou tři typy čípků na sítnici oka vybudeny v určitém poměru. V případě bílého světla jsou trichromatické složky lokalizovány v blízkosti centra diagramu chromatičnosti. Generovat bílé světlo pomocí LED zářičů je možné principiálně dvěma různými způsoby pomocí:

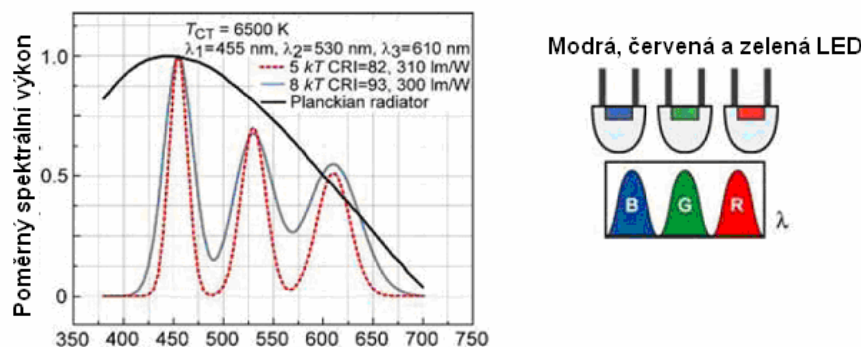
- mixování monochromatických LED zářičů
- konvertoru vlnových délek



Obrázek 2: Komplementace dvou vlnových délek

#### 1.1.4.1 Komplementární vlnové délky

Teorii komplementárních vlnových délek využívají hlavně LED, ale je možné se s ní setkat i jinde. Podstata vychází ze sečny, která prochází kolorimetrickým trojúhelníkem. Hlavním požadavkem je, aby sečna procházela středem trojúhelníku tj. bílým světlem, v tom případě sečna protíná i dvě strany trojúhelníku v místě dvou vlnových délek. Tyto dvě barvy (vlnové délky) vytváří společným zářením bílé světlo (viz. obr. 2). Důležité je zajištění určitého výkonového poměru, který určuje i tón výsledné bílé (studená bílá, teplá bílá). Maximální světelná účinnost takového dichromatického zdroje bílého světla, který je tvořen dvěma monochromatickými barvami, může teoreticky dosahovat hodnotu okolo 400 lm/W. Podobným způsobem generování bílého světla pomocí LED diod nastává při sloučení tří monochromatických LED zářičů (RGB), vznikne tzv. trichromatický světelný zdroj. Avšak v tomto případě jde o společné záření tří zdrojů, jejichž světelný tok lze i samostatně měnit a tím získat i jiné barvy. [2]



**Obrázek 3: Spektra vyzařování tří světelných diod s různou vlnovou délkou vyzařování. Např. kombinací tří světelných diod podle modré křivky lze dosáhnout výsledné bílé barvy světla s teplotou chromatičnosti 8000 K (denní barva světla) [6]**

#### 1.1.4.2 Konvertor vlnových délek

Konverze vlnových délek je metoda vyzařování, která vychází z kratší vlnové délky světelného záření, jejíž část je absorbována v konvertorovém materiálu a znovu vyzařena jako

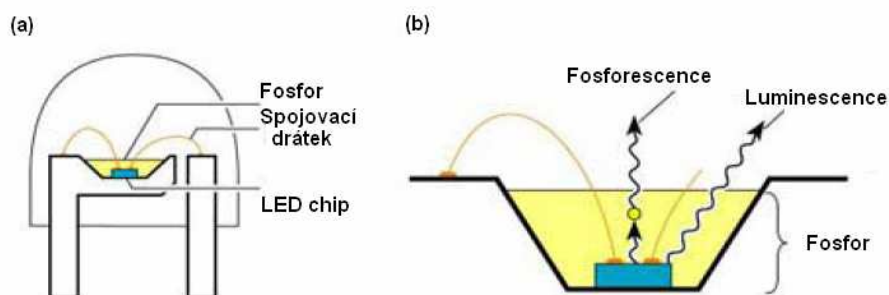
světelné záření s delší vlnovou délkou. Mezi konvertory vlnových délek řadíme fosfory, polovodiče a barviva. Konvertorové materiály vykazují několik důležitých parametrů, jako je absorpční a emisní vlnová délka a velikost kvantové účinnosti. Teoreticky může kvantová účinnost konvertoru dosáhnout 100%. Běžně je však nižší a její velikost závisí na energetických ztrátách spojených s konverzí vlnové délky. Celková energetická účinnost vlnového konvertoru je dána vztahem: [2]

$$\eta = \eta_{ext} (\lambda_1 / \lambda_2) \quad (1.6)$$

$$\eta_{ext} = \frac{\text{počet fotonů vyzářených do prostoru za sekundu}}{\text{počet fotonů injektovaných do LED za sekundu}} \quad (1.7)$$

Nejčastěji používaný vlnový konvertor vlnové délky je fosfor. Fosfor obsahuje anorganickou látku, která je dotována opticky aktivním prvkem.

Barviva jsou dalším typem konvertoru. I jejich účinnost se může blížit 100%. Nicméně barviva, jako organické molekuly, nevykazují po určitém počtu absorpcí fotonu dlouhodobou stabilitu. Obvykle jsou stabilní po 104-105 optických transformacích. Životnost barviva je tak podstatně nižší ve srovnání s fosforovým nebo polovodičový konvertorem. Barviva vykazují také menší rozdíl mezi absorpčním a emisním spektrem. Například rozdíl maxima absorpčního a emisního spektra při použití barviva Kumarin 6 činí pouze 50nm. [2]



**Obrázek 4: Princip vyzařování výkonové světelné diody:**

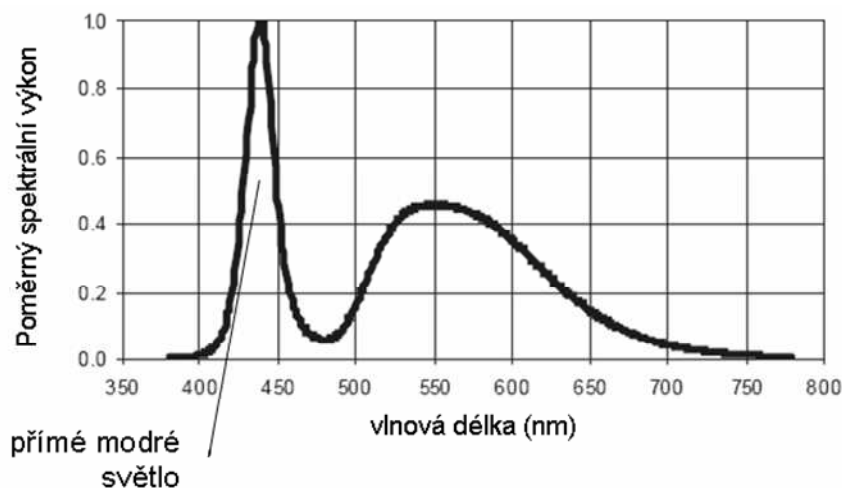
**(a) Struktura světelné diody skládající se z GaInN a fosforu zapouzdřující diodový čip.**

**(b) Fosforescence na delší vlnové délce (žluté světlo) a luminescence (modré barva světla). [6]**

Dalším konvertorem jsou polovodiče. Polovodiče jsou charakterizovány úzkým spektrem vyzařování o šířce  $2kT$ . Interní kvantová účinnost dosahuje až 100%. Problém



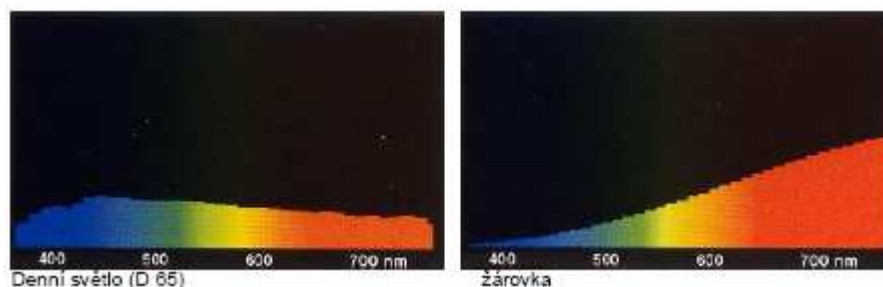
výstupu světla v polovodičovém konvertoru, tzv. fenomén absolutního vnitřního odrazu u LED diod, se neprojeví natolik, protože polovodičový konvertor nepotřebuje kontakty, které by mohly světlo blokovat. [2]



Obrázek 5: Graf spektrálního vyzařování bílé světelné diody [6]

## 1.2 Žárovky

Žárovky jsou prvotními umělými zdroji světla využívající technologii výroby, která je už víc jak 100 let stará. Princip technologie spočívá v tom, že do vnitřku vyčerpané skleněné baňky (vakuum) je uloženo vlákno z wolframu, které je protékáno elektrickým proudem. Elektrický proud způsobuje ohřev vlákna a tím i vyzařování v oblasti viditelného spektra elektromagnetického vlnění (inkandescence). Baňky žárovek jsou vyčerpané na vysoké vakuum proto, aby bylo chráněno vlákno před sloučením s kyslíkem a jeho hořením. Baňky žárovek vyšších výkonů jsou plněny inertními plyny. Měrný výkon žárovek se pohybuje okolo 10 lm.W-1. Se vzrůstající teplotou vlákna vzrůstá jeho hodnota a také teplota chromatičnosti. První uhlíkové žárovky měly měrný výkon 1,7 lm.W-1. Život žárovek se pohybuje okolo 1 000 hodin. Vlivem nových technologií navíjení vlákna a plnění baněk inertními plyny doba života dále vzrůstá. [2]



Obrázek 6: Spektrální charakteristiky denního světla a žárovky

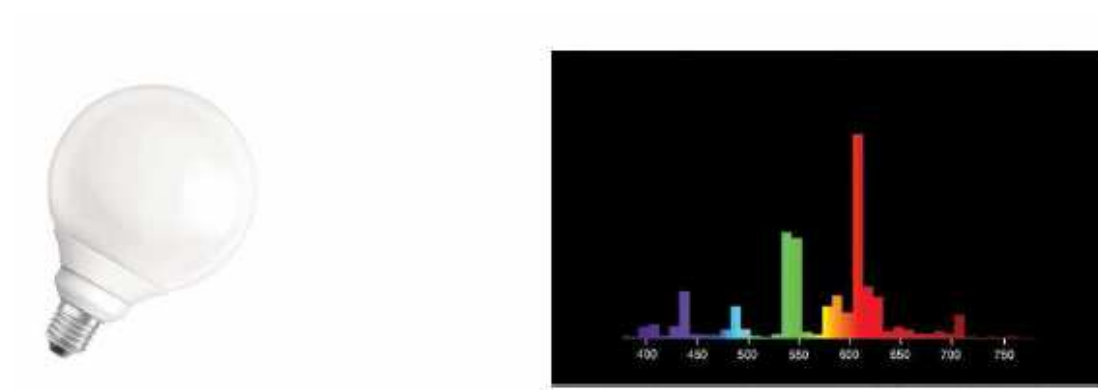
Rozdíly mezi spektrem denního světla a spektrem žárovky velice názorně ukazují příčinu nízkého měrného výkonu žárovek. Většina vyzářené energie se nepohybuje ve viditelné části spektra (380nm – 780 nm), ale až v oblasti infračerveného, tedy neviditelného záření - viz. obrázek 5.

### 1.3 Zářivky

Zářivky jsou nízkotlaké rtuťové výbojky, které vyzařují hlavně v oblasti ultrafialového záření, které se transformuje ve viditelné záření pomocí luminoforu. Princip funkce začíná ve skleněné trubici, kde jsou vlivem elektrického pole mezi elektrodami vybuzeny páry rtuti, ve kterých dochází k emisi neviditelného UV záření. Světlo (a tudíž i barvu světla zářivky) potom zařizuje luminofor. Jako všechny výbojky se ani zářivky neobejdou bez předřadných přístrojů. Po zapálení startérem je napětí na zářivce nižší než napájecí napětí. Na tlumivce se vytvoří úbytek napětí, který omezí proud tekoucí zářivkou. Zářivky lze také provozovat s elektronickými předřadníky. Moderní plně elektronické vysokofrekvenční předřadníky nahrazují tlumivky a startéry a přispívají tak k větší hospodárnosti, vyššímu světelnému komfortu a delší době života zářivek. [2]

Samostatnou sortou zářivek jsou tzv. *Kompakty*. Tyto světelné zdroje se vyznačují následujícími vlastnostmi:

- produkují světlo s vyšším indexem podání barev,
- ve srovnání se žárovkami jsou energeticky úspornější
- velká vyzařovací plocha zaručuje relativně nízké jasy
- mají výrazně delší dobu života.

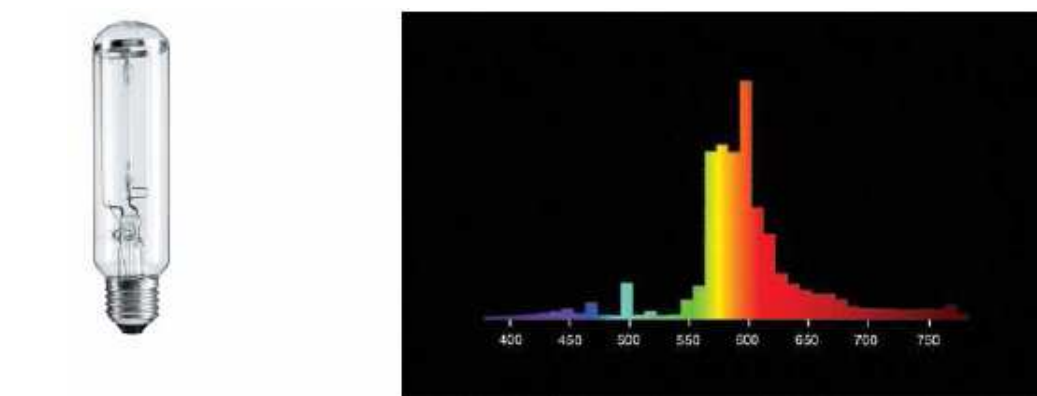


Obrázek 7: Příklad kompaktní zářivky se spektrální charakteristikou

Měrný výkon kompaktních zářivek je v porovnání s běžnými typy žárovek přibližně pětinasobně vyšší. Současně dosahovaná střední doba života kompaktních zářivek je 15 000 hodin, zatímco střední doba života žárovek je 1000 hodin. Kompaktní zářivky vyrábějí světlo na stejném principu jako zářivky U kompaktních zářivek se díky zahnutí a rozdělení skleněných trubiček podařilo dosáhnout rozměrů srovnatelných se standardními žárovkami. [2]

## 1.4 Výbojky

Výbojky (popis se netýká zářivek, jež jsou uvedeny výše) jsou světelné zdroje, které jsou nejhojněji používané pro svůj světelný výkon k osvětlování cest, sportovišť, budov a jiných venkovních ploch. Jejich velikou nevýhodou sice zůstává nižší index podání barev a provozní omezení, což lze zmírnit nebo částečně odstranit kombinacemi (třeba i s jinými zdroji), anebo za pomoci technického přizpůsobení.



Obrázek 8: Příklad vysokotlaké sodíkové výbojky se spektrální charakteristikou

Výbojky se konstruují ve více provedení. Dle materiálu (zdroji světla, udává barvu), dle tlaku (při kterém vzniká výboj) a samozřejmě dle napájecího napětí, požadovaného výkonu a dalších potřeb spotřebitelů. Obecně všechny výbojky fungují (jak už název napovídá) na principu výboje, který zapaluje plyn, páry určitého chemického prvku anebo hoří (popřípadě se udržuje tlakem, frekvencí apod. na požadované teplotě) v ochranné atmosféře. Místo „hoření“ se zajišťuje ve skleněné baňce, v trubici z odolného materiálu nebo ve výbojových trubicích nejrůznějších tvarů. [2]

Nejčastěji používané se tedy dělí na:

- Vysokotlaké rtuťové výbojky
- Nízkotlaké rtuťové výbojky (zářivky)
- Vysokotlaké sodíkové výbojky
- Nízkotlaké sodíkové výbojky
- Halogenidové výbojky

## ***1.5 Světelné diody (LED)***

Elektroluminiscenční diody (LED) se v posledních letech ve stále větší míře využívají v nejrůznějších oblastech osvětlovací techniky. Za své rozšíření vděčí především rostoucí světelné účinnosti a měrnému výkonu. LED dioda je elektronický prvek, který generuje světelné záření při průchodu proudu polovodičovým přechodem. Používá tedy jiný fyzikální princip než žárovky nebo výbojky a má mnoho vlastností, kterými se od klasických zdrojů světla odlišuje. Polovodičový přechod vyzařuje velmi úzké spektrum, záření je v podstatě monochromatické. V současnosti jsou však na trhu prvky všech potřebných barev, se třemi čipy v jednom pouzdru, i LED diody v jednotlivých barvách vhodných pro skládání bílé (komplementární vlnové délky). Dalším způsobem je použití LED čipu, který se uvnitř pouzdra ještě opatří vrstvou aktivní hmoty, která na principu podobném luminoforu částečně převede záření na jiné vlnové délky viditelného spektra (Konvertor vlnových délek). Výsledným efektem je téměř bílá barva. LED diody mají potenciál stát se vysoce účinným světelným zdrojem. Nejvíce zajímavé jsou nové aplikace v obecném osvětlování, kde LED se začínají prosazovat namísto konvenčních světelných zdrojů. [2]

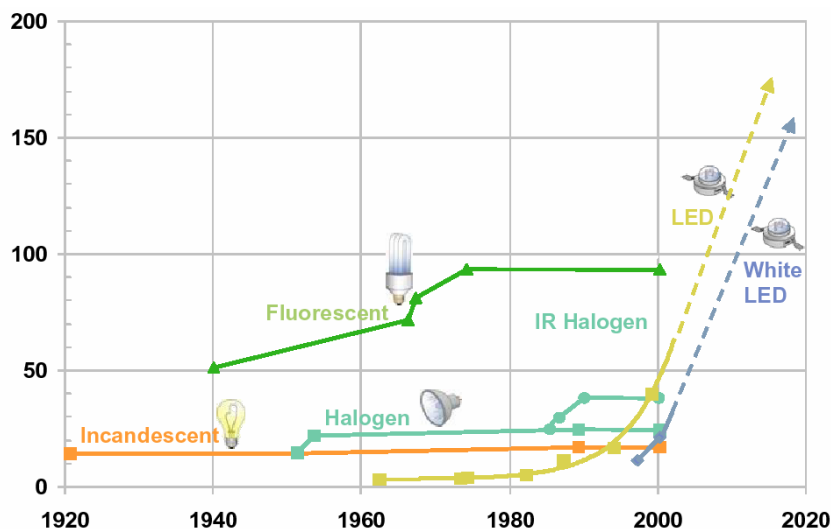


Obrázek 9: Příklad světelné diody

### 1.5.1 Výkonové LED

Jak už bylo uvedeno LED se v nynější době široce aplikují do světelných zdrojů, které se stávají alternativou za klasické domácí žárovkové zdroje, venkovní veřejné osvětlení nebo světlomety automobilů aj. Za tímto rozmachem může i vývoj tzv. výkonových LED.

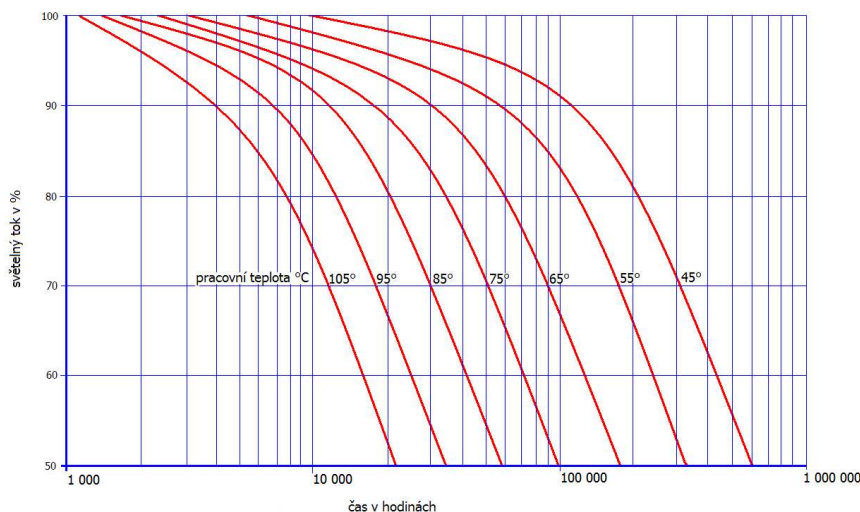
Měrný výkon výkonových světelných diod se pohybuje okolo 100 lm/W u nejlepších zdrojů a to za optimálních podmínek (70 – 135 lm/W). Tato hodnota se v současnosti začíná vyrovnávat měrným výkonům zářivek a halogenidových výbojek a v brzké budoucnosti má potenciál ještě výrazně narůstat.“



Obrázek 10: Graf odhadu vývoje měrného výkonu různých světelných zdrojů

Doba života (životnost) se u bílých výkonových světelných diod udává okolo 50000 hodin, přičemž v průběhu této doby světelný tok klesá podobným způsobem jako je tomu u klasických světelných zdrojů. Doba života ale silně závisí na dodržení maximální provozní teploty udávané výrobcem. Při vylepšení teplotních podmínek na vlastním PN přechodu

světelných diod lze očekávat životnosti až okolo 100000 hodin. Srovnáme-li dobu života světelných diod s světelnými zdroji, pak můžeme konstatovat, že světelné diody již v současné době začínají převyšovat v tomto parametru ostatní světelné zdroje.



Zdroj CREE

**Obrázek 11: Závislost životnosti a teploty LED (teplota na PN přechodu)**

Světelné diody vyzařují v infračervené oblasti pouze minimální množství energie, a proto je lze používat i na osvětlování předmětů citlivých na teplo. Nicméně čipy výkonových světelných diod teplo generují, a proto je nutné je chladit. Z důvodu nutnosti odvodu tepla z „relativně malého“ PN přechodu se maximální hodnoty příkonů jednotlivých světelných diod v současné době pohybují do 5 W. Odolnost proti otřesům je vůči klasickým teplotním a výbojovým světelným zdrojům vysoká. Je srovnatelná s mechanickou odolností jiných elektronických součástek. Záleží především na způsobu a kvalitě montáže vzhledem k aplikacím. Jejich mechanická odolnost je předurčuje k použití ve všech typech mobilních prostředků a v dopravní technice. Napájecí napětí je na rozdíl od většiny klasických světelných zdrojů nízké a stejnosměrné. Tuto vlastnost lze chápat jako konkurenční výhodu proti ostatním světelným zdrojům především v mobilních aplikacích využívajících bateriového napájení.

Barva světla závisí na výběru teploty chromatičnosti modulů se světelnými diodami pro konkrétní aplikace. Tento parametr je velmi důležitý z pohledu použití světelných diod do různých aplikací. Vzhledem k používaným technologiím výroby bílé barvy světla transformací světelného toku z kratších vlnových délek se dosahují vyšší měrné výkony u světelných diod s vysokou teplotou chromatičnosti. Index podání barev se pohybuje u bílých

výkonových diod spíše do 80. Pro použití v prostorách s předpokládaným trvalým pobytem osob, je nutné tomuto parametru věnovat zvýšenou pozornost.



**Obrázek 12: Příklad LED svítidel**

Úhel vyzařování světelného svazku je u běžně dostupných světelných diod od 10 do 100 stupňů. Malých úhlů svazku lze dosáhnout bez použití vnějších reflektorů již samotnou optikou pouzdra. Přímým směřováním světelného toku bez následných přidavných odrazů a prostupů světelných paprsků se dosahuje výrazně vyšších hodnot účinnosti svítidel. To ale vyžaduje naprosto odlišnou a novou filozofii konstrukce svítidel. Nastavení požadované distribuce světelného toku např. skládáním světelných diod do modulů lze snadno dosáhnout téměř libovolného tvaru křivky svítivosti.

U svítidel, které jsou tvořeny výkonovými LED, se maximální příkon svítidel v současné době pohybuje maximálně do 100 W. Tento limit je de-facto dán možnostmi chlazení svítidel při normální teplotě okolí (20 – 25°C) [6]

## 2 Spektrofotometrie a její využití ve světelné technice

### 2.1 Fotometrie v chemii, v materiálovém inženýrství a ve výzkumu textílií

Spektrofotometrie, obecně používána k měření množství světla propuštěného, odraženého nebo pohlceného jistou látkou v závislosti na vlnové délce, se v technice používá zejména k měření hlavních světelných veličin a jejich zpracování, ale i k určování souřadnic kolorimetrického trojúhelníku a z něj následného určení barvy, popřípadě odstínu. V neposlední řadě taktéž zpracované informace o světle spektrofotometrem zachyceném mohou být použity k zjištění vlastností předmětu nebo materiálu, od kterých bylo světlo odráženo do přístroje, popřípadě materiálem do přístroje prošlo, a tak určit nejen prostupnost a barvu měřeného předmětu, ale i jeho chemické složení.

V chemii lze použít tento druh měření ke kvalitativní organické a kvantitativní analýze. Při použití v kvantitativní analýze se využívá schopnosti pohltit elektromagnetické záření. Příjem kvanta elektromagnetického záření přivede molekulu do vyššího (tzv. excitovaného) energetického stavu. Protože molekuly mohou existovat pouze v určitých energetických stavech, absorbují elektromagnetické záření pouze určitých vlnových délek. Taková vlnová délka elektromagnetického záření je určena vzdáleností dvou energetických hladin, mezi kterými molekula přechází. Energeticky nejnáročnější jsou přechody mezi elektronovými energetickými hladinami. Elektronové přechody zapříčiňují absorpci ultrafialového (190 až 400 nm) a viditelného záření (400 až 800 nm). Látky, které absorbují viditelné světlo jsou barevné. Absorpci záření lze měřit na přístrojích, které se nazývají *absorpční spektrometry*.

Absorpční spektrum slouží ke kvalitativní identifikaci sloučenin, zejména organických, s chromoforními skupinami (tj. skupinami, které jsou příčinou zbarvení molekul), konjugovanými dvojnými vazbami apod. V takovýchto seskupeních totiž může docházet k četným energetickým přechodům, a proto molekuly obsahující tato uskupení absorbují v ultrafialové či viditelné oblasti. Pro kvantitativní analýzu je nutné vybrat takovou vlnovou délku, při níž stanovovaná látka silně absorbuje a ostatní látky mají absorpci minimální.



Při spektrofotometrickém stanovení se pracuje obvykle postupem přímé fotometrie, tzn. stanovení koncentrace látky z měření absorpance roztoku vzorku. Ve většině měření se používá srovnávání, kdy se proměří absorpance několika roztoků známých koncentrací.

U fyzikálněchemických oborů se používá hmotnostní spektroskopie, která slouží k určování hmotnosti molekul a jejich částí. Hmotnostní spektrometr je iontově optické zařízení, které ze směsi molekul a iontů separuje nabitě částice podle jejich *efektivní hmotnosti*  $m/z$  ( $m$  je hmotnost,  $z$  je náboj) a umožňuje je stanovit. Dále poskytuje údaje o relativním zastoupení iontů stejné hmotnosti v celkovém množství iontů ve směsi. Záznam molekulárních a fragmentových iontů je charakteristický pro danou látku a dává cenné informace o její struktuře a na jeho základě lze většinou strukturu látky odvodit nebo potvrdit. Hmotnostní spektrometrie je metoda citlivá a umožňuje analyzovat látky v množství kolem  $10^{-9}$  g

Při výrobě textilu, rázem po jeho barvení, se v poslední době dbá na vyhodnocování barevnosti, neboli rozdílnosti barvy výrobku ku barvě požadované výrobcem. Vše je dáno požadavky zákazníka, kdy se výrobce snaží garantovat co nejmenší tolerance v odstínu.

Protože u textílie jde čistě jen o subjektivní vnímání barev látky, je měřena jen odraznost a z ní vyplývající barva. Měřicí systém a protokol je tedy podobný měření odrazů a barev v materiálovém inženýrství. Jediná odlišnost je v metodických postupech při vyhodnocování dat získaných měřeními. Používají se nejrůznější rovnice k posuzování barev, kvality, reakci na odlišná světla atd. [15] a [16]

## ***2.2 Spektrofotometrie ve světelné technice***

Na rozdíl od fotometrických metod používaných v jiných odvětvích, spektrofotometrie používaná ve světelné technice nesnímá prostup světla skrz materiály, ale vyhodnocuje vlastnosti světlené informace dopadající na sondu (snímač) většinou přímo ze světelného zdroje popřípadě jeho osvětlovací působení (osvětlení, síla odrazu atd.) na okolí. Zatímco fotometrické výstupy v jiných oborech jsou spíše nakonec vyhodnoceny jako tíha, množství, složení (po stránce chemické) určitého prvku, tak ve světelné technice výstupy tvoří škála fotometrických veličin v čele s osvětleností a barvou měřeného světla. Přesto se spektrofotometrie paradoxně používá nejméně ve světelné technice.

Spousta méně technicky náročnějších přístrojů dokázali změřit informace o světelných zdrojích, které do jisté doby byly dostačující. Až vývoj mikroelektroniky v 90. letech v oblasti víceelementových optických detektorů jako jsou CCDA (Charged Coupled Devices Array) detektor a PDA (Photo Diode Array) detektor umožňující konstrukce optických zařízení jako jsou levné scannery a kamery. Tyto detektory jsou dnes používány ke konstrukci rychlých, skenujících spektrometrů bez mechanicky pohyblivých disperzních elementů. Při použití opticky vodivých kabelů je možné snadno vytvářet modulární, snadno obměňovatelné a rychlé optické měřicí systémy, které efektivněji snímají a vyhodnocují světelnou informaci použitelnou pro návrhy osvětlených prostor, či svítidel samotných. [17]

Přístroje používané ve světelné technice:

- Luxmetry
- Jasoměry
- Spektrofotometry

Právě na těchto třech přístrojích je patrný rozdíl ve schopnosti pozorovat a vyhodnocovat světelné veličiny. Zatímco u luxmetrů lze měřit pouze osvětlenost (popřípadě světelný tok) a to za použití nástavce nebo tzv. *kulového integrátoru*, u jasoměru již lze měřit tzv. *jasovou mapu*, tedy rastr jasů svítidla (popřípadě osvětleného objektu). Jedná se tedy v podstatě o upravené fotoaparáty, které již neslouží k zábavě, nebo umění, ale slouží k výzkumu a měření svítidel, osvětlovaných prostor, ploch a komunikací. Tyto přístroje jsou tedy i složitější. Jedná se o principy rozkladu světla a dílčí analýzu, kterou, jak již bylo výše uvedeno, obstarává mikroelektronika.

Stejně tak je to u spektrofotometrů. U přístrojů tohoto typu je požadavek rozdělit přivedenou světelnou informaci (paprsek) na podrobné spektrum. K tomuto účelu je v přístroji přítomen optický systém, který paprsek zvětší, rozdělí na spektrum, popřípadě vytvoří rastr pomocí tzv. mřížky (příklad na obr. 9). Snímač poté předává již elektronickou (binární) informaci přes počítačové rozhraní softwaru, který data vyhodnocuje a zobrazuje ve formě grafických nebo jen jednoduše číselných.

## 2.3 *Spektrofotometrická měření ve světelných laboratořích*

Možnosti měření světelných veličin v laboratořích světelné techniky závisejí ve veliké míře na vybavenosti laboratoře. Vzhledem k v minulosti provedených měřeních v laboratořích Vysoké školy Báňské je možno uvést ukázkový příklad možností spektrofotometrie, popřípadě spektrofotometrů ukázkové firmy, a jejich schopnosti zobrazení světelných veličin.

K měření byl použit Spektrofotometr AvaSpec spolu s různými pomůckami. Jsou to:

**Kosinův nástavec** – který je připevněn k optickému vláknu, jimž světelná informace putuje až k optickému systému, který jí zpracovává. Sondu s nástavcem lze buď připevnit na fotometrickou lavici nebo do kulového integrátoru, což záleží na charakteru měření. Je vhodné určit pro měření osvětleností vzdálenost sondy od zdroje.

**Kulový integrátor** – je otvíratelná dutá koule, která slouží k složitějším, ale přesnějším (popř. srovnávacím) měřením. Její vnitřní plocha má vysoce odraznou a barevně neselektivní plochu a instaluje se do ní sonda i světelný zdroj (popř. srovnávací zdroj).

**Miniaturní kulový integrátor** – který lze stejně jako kosinův nástavec připevnit k optickému vláknu. Je určen pro snímání LED diod, k čemuž slouží malý otvor ve vrchní části integrátoru. Cesta světelné informace po optickém vlákně je stejná jako u kosinova nástavce.

**Fotometrická lavice** – je konstrukce, na níž lze v různých vzdálenostech od sebe instalovat zdroj a sondu pomocí různých držadel. Za pomocí těchto pomůcek (otáčivých ramen, clon, masek apod.) lze měřit osvětlenost ve vztahu vzdáleností a úhlů dopadu.

### 2.3.1 Měření spektrálních charakteristik

Při těchto laboratorních měření byla jako jedna z výstupních zpracování, možnost vykreslení *spektrální charakteristiky*, což je sloupcový graf znázorňující velikost světelného toku při určité vlnové délce, nebo-li na kterých barvách spektra zdroj nejvíce vyzařuje. Softwarové rozhraní spektrofotometru graf převádí ze sloupcové podoby do podoby bodově-

spojité. Tudíž každá vlnová délka nemá svou linku o určité velikosti, ale jejich vrchol reprezentuje bod. Body všech vlnových délek jsou poté spojeny v graf.

V softwaru se charakteristika zobrazuje v souřadnicovém systému  $x - y$ , kdy na ose  $x$  je zanesena vlnová délka, která reprezentuje světelné záření. Osa  $y$  je členěna poměrnou spektrální citlivostí. S výstupní charakteristikou lze dále pohodlně v softwarovém prostředí pracovat.

U použitých přístrojů systém detekoval saturaci, tzn. oblast grafu, kde intenzita světelná informace způsobovala přesycení elektronického elementu (jeho části), a tudíž docházelo k chybovému zkreslení. V takovém případě se parametry snímání upravují až do chvíle přijatelného (nezkresleného) výsledného grafu.

### **2.3.2 Měření kolorimetrického trojúhelníku, teploty chromatičnosti a světelných veličin**

V softwarovém rozhraní bylo možné dále otevřít speciální protokol navíc pro měření dalších nejen fotometrických veličin. Před zobrazením je však potřeba zvolit měřicí pomůcku (kosinův nástavec nebo miniaturní kulový integrátor). Poté následoval výběr z několika skupin výstupních veličin:

- Kolorimetrické veličiny
- Radiometrické veličiny
- Fotometrické veličiny
- Měření špičky

Z optických výstupů u tohoto přístroje bylo možno vytvořit kolorimetrický trojúhelník s uvedením souřadnic  $x$  a  $y$ , zobrazení barvy měřeného zdroje nebo povrchu, výpočet teploty chromatičnosti a procentuální hodnoty sytosti zobrazené barvy. Z fotometrických veličin potom velikost světelného toku, svítivost a osvětlenost. Osvětlenost nebyla měřena přímo, ale počítána z uvedené vzdálenosti sondy a měřícího objektu, známého úhlu kosinova nástavce a svítivosti (pokud zanedbáme úhel lze považovat za normálovou osvětlenost viz. výše).

## 2.4 Způsoby měření barev

Číselné údaje vystihující barevný podnět lze v podstatě získat třemi způsoby, a to měřením:

- Spektrofotometrickým
- Srovnávacími kolorimetry
- Fotometrujícími kolorimetry

Spektrofotometrická měření se považují za základní, neboť při nich lze dosáhnout nejpřesnějších výsledků. Proto se využívají i pro stanovení etalonů. Tato měření se provádějí s využitím monochromátorů, resp. spektrofotometrů s vestavěnými monochromátory. Těmito přístroji se získají spektrální charakteristiky barevného podnětu od sledovaných primárních či sekundárních zdrojů a z nich se buď výpočtem, nebo použitím integrátorů připojených ke spektrometrům stanovují odpovídající trichromatické složky, resp. souřadnice ve zvolené trichromatické soustavě.

U srovnávacích kolorimetrů se v jejich zorném poli porovnává měřený barevný podnět s obvykle třemi měrnými podněty přístroje. Změnou měrných podnětů přístroje se vždy zorné pole vyrovná tak, aby se barva srovnávacích částí zorného pole shodovala. Ze zjištěných údajů ovládacích prvků přístroje se pak stanovují hledané trichromatické souřadnice. Některé přístroje bývají přímo kalibrovány v trichromatických složkách. Tato měření jsou pohodlnější, rychlejší, ale méně přesná než spektrofotometrická měření, ale pro množství potřeb praxe plně vyhovují.

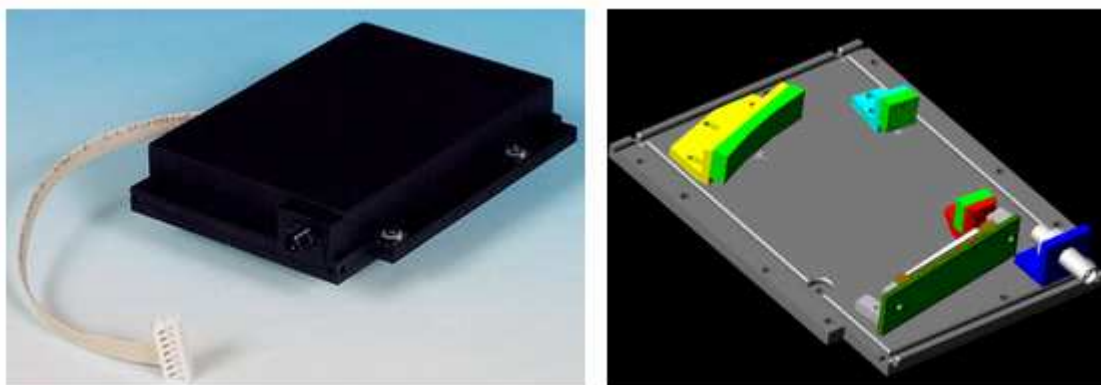
Fotometrujícím kolorimetrem se přímo stanovuje velikost trichromatických složek, resp. souřadnic. Fotometrické hlavy těchto kolorimetrů jsou vybaveny třemi receptory, jejichž spektrální citlivost je upravena tak, že se přímo měří veličiny úměrné trichromatickým složkám barevného podnětu. Měření fotometrujícími kolorimetry je nejrychlejší, nepohodlnější a nejjednodušší. Přesnost a správnost naměřených hodnot jsou však velmi závislé na použitém principu a kvalitě zhotovení čidel i vyhodnocovacího zařízení. Přístroje je nutné pečlivě a pravidelně ověřovat. [5]

### 3 Spektrofotometry firem Avantes a JeTi, kalibrace

O využití spektrofotometrických přístrojů se zmiňuje předešlá kapitola, avšak zde je třeba uvést přístroje, jichž se týká provedené měření. Stejně jako většina kolorimetrických a spektrofotometrických přístrojů na trhu získávají světelnou informaci způsobem popsaným výše, tak i u přístrojů Avantes a JeTi tomu není jinak. Světlo, které je buď ze srovnávacího zdroje, nebo zdroje měřeného, se snímá optikou ve formě čočky nebo optického vlákna (např. s kosinovým nástavcem), a poté je děleno přes hranol na spektrum, které dopadá buď dělené na několik senzorů, anebo vcelku na senzor jeden. Senzorický snímač na elektronické bázi předá informaci procesoru a ten zpracovanou informaci zobrazuje (např. skrz softwarové vybavení počítače).

#### 3.1 Spektrofotometr AvaSpec-2048 firmy Avantes

Spektrofotometr AvaSpec-2048 od Avantes je založen na použití detektorů CCD. Kabelové optické UV/VIS spektrometry Avantes tvoří optická lavice podle Czernyho-Turnera se standardním vstupem optickým kabelem, mřížkou pro žádaný spektrální rozsah, kolimačními zrcátky a více-elementovým detekčním polem. Spektrometr AvaSpec-2048 je vybaven CCD detektorem Sony ILX501 s lineárním polem 2048 elementů. Absolutní citlivost je 86 fotonů/impuls. Efektivní spektrální rozsah je 200-1100 nm.



Obrázek 13: Optická lavice Czernyho-Turnera s vnitřním náhledem

Měřicí aparatura se skládá z vlastního spektrometru a z řídicího PC. Spektrometr je složen optické soustavy se CCD detektorem a USB převodníku. Přístroj je dále vybaven kosinovým nástavcem, popř. miniaturním kulovým integrátorem, který se taktéž připevňuje přímo na optické vlákno.

Digitálně analogový převodník ADC-1000-USB (14 bitů, 1,33MHz), který zajišťuje komunikaci spektrometru s PC a transport dat, je k PC připojen přes rychlé USB rozhraní.

Napájení je zajištěno transformovaným napětím ze sítě na 12 VDC, 160 mA.



**Obrázek 14: Spektrofotometr AvaSpec-2048**

Přístroj AvaSpec-2048 je nově taky vybaven novější verzí softwaru AvaSoft 7.4, díky kterému přibýly nové možnosti v měření. Ty nejzásadnější změny jsou v oblasti měření Indexu podání barev. S tím souvisí i nutnost kalibrace.

Kalibrace se u přístroje AvaSpec provádí právě pro další kolorimetrická měření. Jde vlastně o halogenový zdroj určitých vlnových délek, který se načte jako referenční kalibrační data. Při vybraných měření se tyto data otevírají a přidávají se k měřeným vzorkům jako chybějící část spektrální charakteristiky. Spolu s kalibračními daty lze tedy naplno využívat všechny možnosti měření. Zdroj kalibračních vlnových délek je součástí sestavy od firmy Avantes. [17]

### ***3.2 Spektrofotometr firmy Specbos 1211 od firmy Jeti***

Spektrometr firmy Jeti a jejich charakterový popis chybí. Před zadáním této práce byla snaha v dlouhodobém plánu získat pro laboratoř VŠB-TUO i spektrofotometr této firmy, aby bylo možné vypracovávat srovnávací měření. Před a při zpracování této práce však přístroj stále není k dispozici, tudíž není možné ani srovnání, ani případný záznam o kalibraci.



## 4 Výpočet a měření indexu podání barev $R_a$

Pokud chceme znát, tedy přesněji změřit, index podání barev, je potřeba definovat pojmy jako je barva, nebo vnímání barev. Přestože jsou to všechno teorie z oblasti lidského poznání zrakovým orgánem, které je závislé na subjektivnosti pozorovatele, normy jasně definují jistá fakta a uznávané mezinárodní dohody.

### 4.1 Barevný vjem a podnět

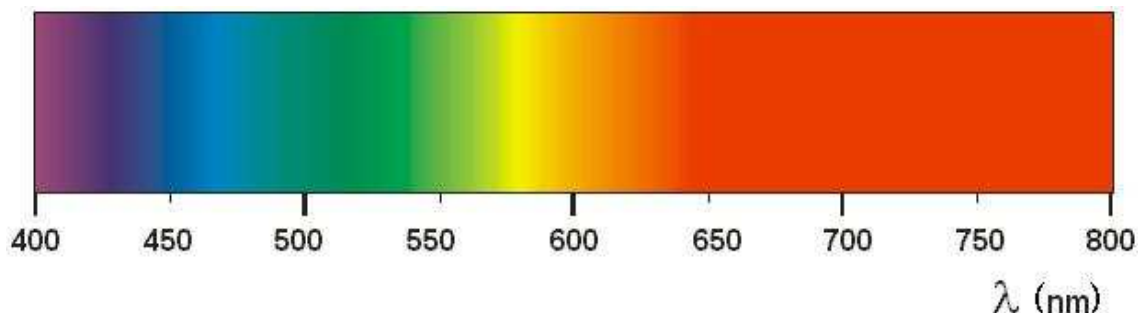
Ve světelné technice se barva nechápe jako směs pojidla a barviva, ale pojem barva, přesněji řečeno *vjem barvy*, označuje vlastnost zrakového počítka, která umožňuje pozorovateli zjistit rozdíl mezi dvěma ploškami zorného pole, které mají stejnou velikost, tvar i strukturu, přičemž tento rozdíl má stejnou povahu jako rozdíl, který by vznikl změnou spektrálního složení světla. Výjimkou jsou *metamerní barvy*, které i při rozdílném spektrálním složení vzbuzují stejný vjem barvy. Pojem barva tedy patří do oblasti vjemové (psychosenzorické).

Běžně se však pojem barva přenáší i na vlastnost světla a předmětů a hovoří se o barvě světla nebo o barvě předmětů. Přesněji se však barevné vlastnosti světla označují názvem *chromatičnost* a barevné vlastnosti předmětů pojmem *kolorita*. Tyto vlastnosti lze jednoznačně vyhodnotit fyzikálně podle spektrálního složení barevného podnětu a spektrální citlivosti zraku k záření různých vlnových délek. Chromatičnost je určena spektrálním složením záření vysílaného primárním zdrojem. Kolorita je určena spektrálním složením záření zdroje osvětlujícího sledovaný předmět a spektrální odrazností či propustností materiálu předmětu. Chromatičnost a kolorita jsou proto pojmy psychofyzikální.

Monofrekvenční složky jakéhokoliv záření se ve viditelné oblasti spektra vyznačují tím, že budí zcela určitý barevný počitek; tj. záření každého kmitočtu přísluší jednoznačně určitá spektrální barva. Obráceně to však neplatí. Zrakový orgán vnímá záření aditivně a odezvy na monochromatické složky skládá na určitý zrakový vjem barvy. Nemá však schopnost složené záření analyzovat. [4]

Tab. 1: Barevné tóny viditelného světla [2]

Vlnová délka $\lambda(\text{nm})$	Barevný tón spektrální barvy
380 ÷ 420	Fialová
420 ÷ 440	Modrofialová
440 ÷ 460	Modrá
460 ÷ 510	Modrozelená
510 ÷ 560	Zelená
560 ÷ 590	Žlutá
590 ÷ 650	Oranžová
650 ÷ 780	Červená



Obrázek 15: Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření [2]

Kvalitativní odlišnost vjemu jednotlivých spektrálních barev se nazývá *barevný tón* a vyjadřuje se názvy fialová, modrá, zelená apod. Vnímání určitého barevného tónu je u každého pozorovatele poněkud odlišné a je podmíněno jednak množstvím energie vyzařované v dané oblasti vlnových délek, jednak citlivostí oka.

Záření charakterizované určitým spektrálním složením a světelným tokem či jasnem, který vniká do oka pozorovatele a budí barevný počitek, se označuje názvem *barevný podnět*. Spektrální složení barevného podnětu se popisuje křivkou poměrného spektrálního složení barevného podnětu, tj. průběhem závislosti poměrné spektrální hustoty zářivého toku  $\varphi_{e\lambda}$  na vlnové délce  $\lambda$ . Hodnoty funkce  $\varphi_{e\lambda}(\lambda)$  jsou vztaženy např. k maximální hodnotě

$$\Phi_{e\lambda\max} = \left( \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\max} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-1}; \text{W}, \text{m}) \quad (4.1)$$

závislosti spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce, tj. pro vlnovou délku  $\lambda$  bude

$$\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \frac{\Phi_{e\lambda}}{\Phi_{e\lambda\max}} = \frac{\left(\frac{d\Phi_{e\lambda}(\lambda)}{d\lambda}\right)_{\lambda}}{\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}\right)_{\max}} \quad (4.2)$$

Při hodnocení barevných vlastností předmětů se pracuje s poměrným spektrálním složením

- odraženého záření, tj. s veličinou  $\varphi_{e\lambda\rho}(\lambda) = \varphi_{e\lambda}(\lambda) \rho(\lambda)$
- propuštěného záření, tj. s veličinou  $\varphi_{e\lambda\tau}(\lambda) = \varphi_{e\lambda}(\lambda) \tau(\lambda)$

Z toho vyplývá, že počitek barvy je fyzikálně určen spektrálním složením barevného podnětu, což je objektivně měřitelná fyzikální realita nezávislá na zrakovém orgánu. [4]

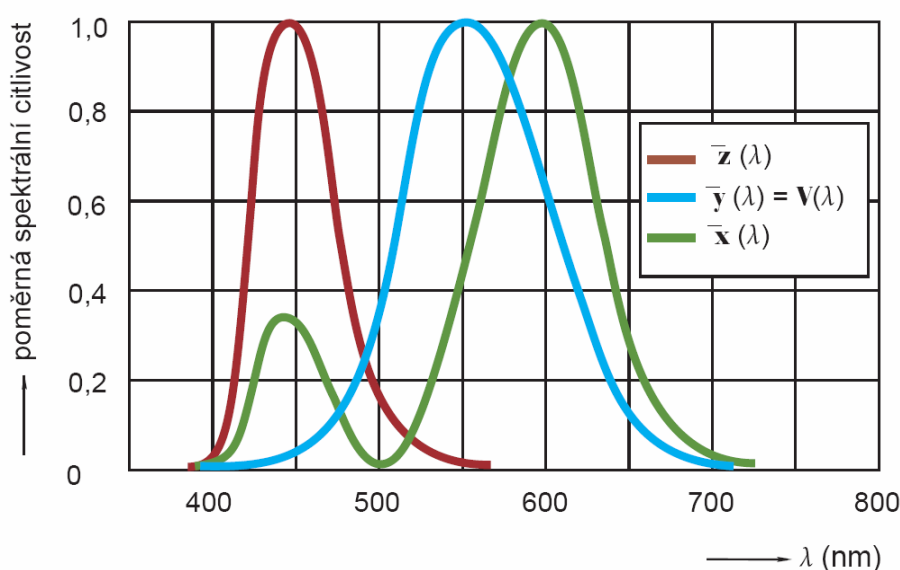
## 4.2 Trichromatické soustavy

K popisu barev se používají kolorimetrické soustavy. Pro přesné charakterizování barev jsou zapotřebí tři údaje, např. čísel. Proto bývají kolorimetrické soustavy také nazývány trichromatické soustavy a jsou založeny na tom, že libovolný barevný podnět lze nahradit adiční směsí tří vhodně zvolených měrných barevných podnětů (světel). Obecně jsou měrné barevné podněty tři lineárně nezávislé, ale jinak libovolně zvolené barevné podněty.

Kolorimetrická množství tří měrných barevných podnětů, jejichž adiční směsí je možné vzbudit stejný barevný vjem jako uvažovaným barevným podnětem, se nazývají *trichromatické složky* a značí se velkými písmeny Č, Z, M; X, Y, Z; R, G, B apod. K výpočtu trichromatických složek se využívají *kolorimetrické koeficienty*, označované např.:

$$\begin{aligned} &\bar{c}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \\ &\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \\ &\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda) \end{aligned}$$

Jsou to poměrná kolorimetrická množství měrných barevných podnětů (světél) dané soustavy, jimiž se popisuje monochromatická složka izoenergetického spektra, tedy spektra charakterizovaného konstantní hodnotou zářivého toku v oblasti sledovaných vlnových délek, tj.  $\Phi_e(\lambda) = \text{konst.}$  Souhrn kolorimetrických koeficientů pro všechny vlnové délky vytváří křivky trichromatických koeficientů, např. viz obr. 15, kde jsou nakresleny křivky kolorimetrických koeficientů pro soustavu X, Y, Z. V podstatě se tedy uvažuje existence tří přijímačů záření s poměrnými spektrálními citlivostmi rovnými odpovídajícím kolorimetrickým koeficientům.

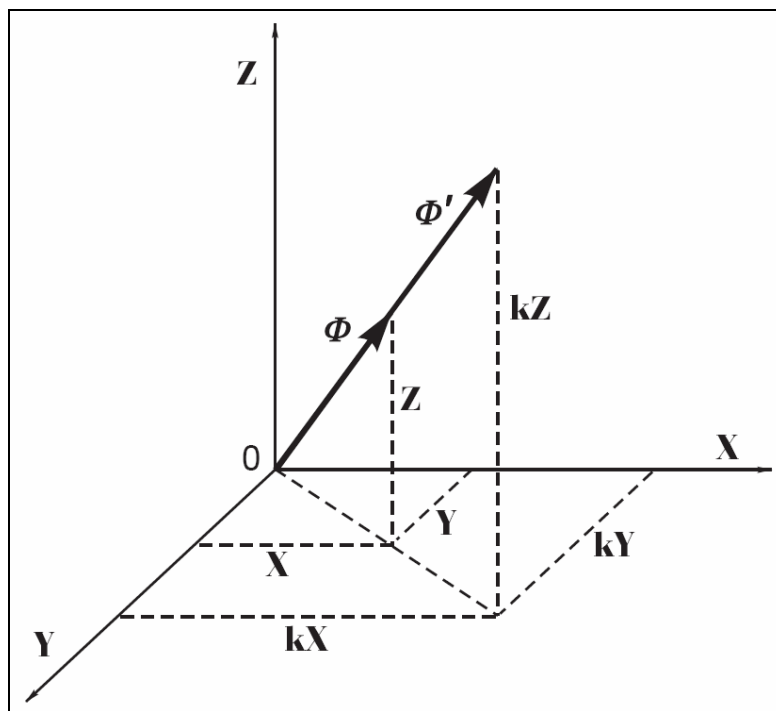


**Obrázek 16: Spektrální průběhy kolorimetrických koeficientů trichromatických soustav XYZ**

Trichromatické složky lze vypočítat násobením z rovnice (4.2) určené poměrné spektrální hustoty zářivého toku  $\varphi_{e\lambda}(\lambda)$  barevného podnětu kolorimetrickými koeficienty a integrací těchto součinů v celé oblasti spektra, tj. např. v soustavě XYZ se složky stanoví z výrazů

$$\begin{aligned}
 X &= \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
 Y &= \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
 Z &= \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Tři údaje charakterizující barevný podnět – barevný tón, sytost barvy a intenzita (světelný tok nebo jas) barvy – jsou tedy jednoznačně určeny třemi nezávislými složkami trichromatické soustavy, např. X, Y, Z, které je možné znázornit v trojrozměrné soustavě souřadnic (obr. 16).



Obrázek 17: Prostorové znázornění barevných podnětů v pravoúhlé soustavě souřadnic XYZ

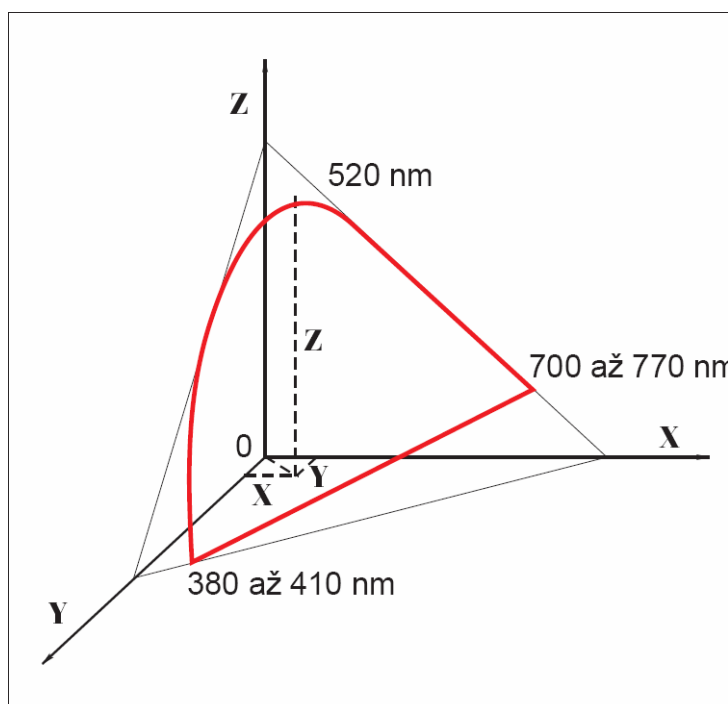
V takto vzniklém třibarevném prostoru jsou základní barvy všech intenzit znázorněny osami souřadnic např. X, Y, Z. Různé barevné tóny (všech intenzit) jsou vyjádřeny přímkami procházejícími počátkem 0. Světelný tok, resp. jas barevného podnětu je však úměrný algebraickému součtu trichromatických složek ( $X + Y + Z$ ), a není tedy určen velikostí vektoru  $\Phi$ . Barevné podněty  $\Phi$  a  $\Phi'$ , které mají stejný barevný tón a stejnou sytost, leží na stejné přímce procházející počátkem. Jsou-li jejich světelné toky úměrné,  $\Phi' = k \Phi$ , i pro složky platí  $X' = kX$ ,  $Y' = kY$  a  $Z' = kZ$ .

Na základě uvedeného lze barevný podnět se světelným tokem  $\Phi$  v pravoúhlé soustavě souřadnic, např. X Y Z, popsat kolorimetrickou rovnicí ve tvaru

$$\Phi = XX^0 + YY^0 + ZZ^0 \quad (4.4)$$

kde  $X^0$ ,  $Y^0$ ,  $Z^0$  jsou jednotkové podněty orientované ve směru os ve zvolené pravoúhlé soustavě souřadnic.

Protne-li se prostorová soustava XYZ rovinou vytínající na osách stejné úseky (např. rovina, pro niž též platí  $X + Y + Z = 1$  (obr. 17)), vznikne v kolorimetrickém prostoru trojúhelník barev. V něm čisté spektrální barvy leží na křivce uzavřené mezi stranami trojúhelníku a každý bod uvnitř této křivky popisuje jednu barvu. Prostorové zobrazení je však nepraktické.



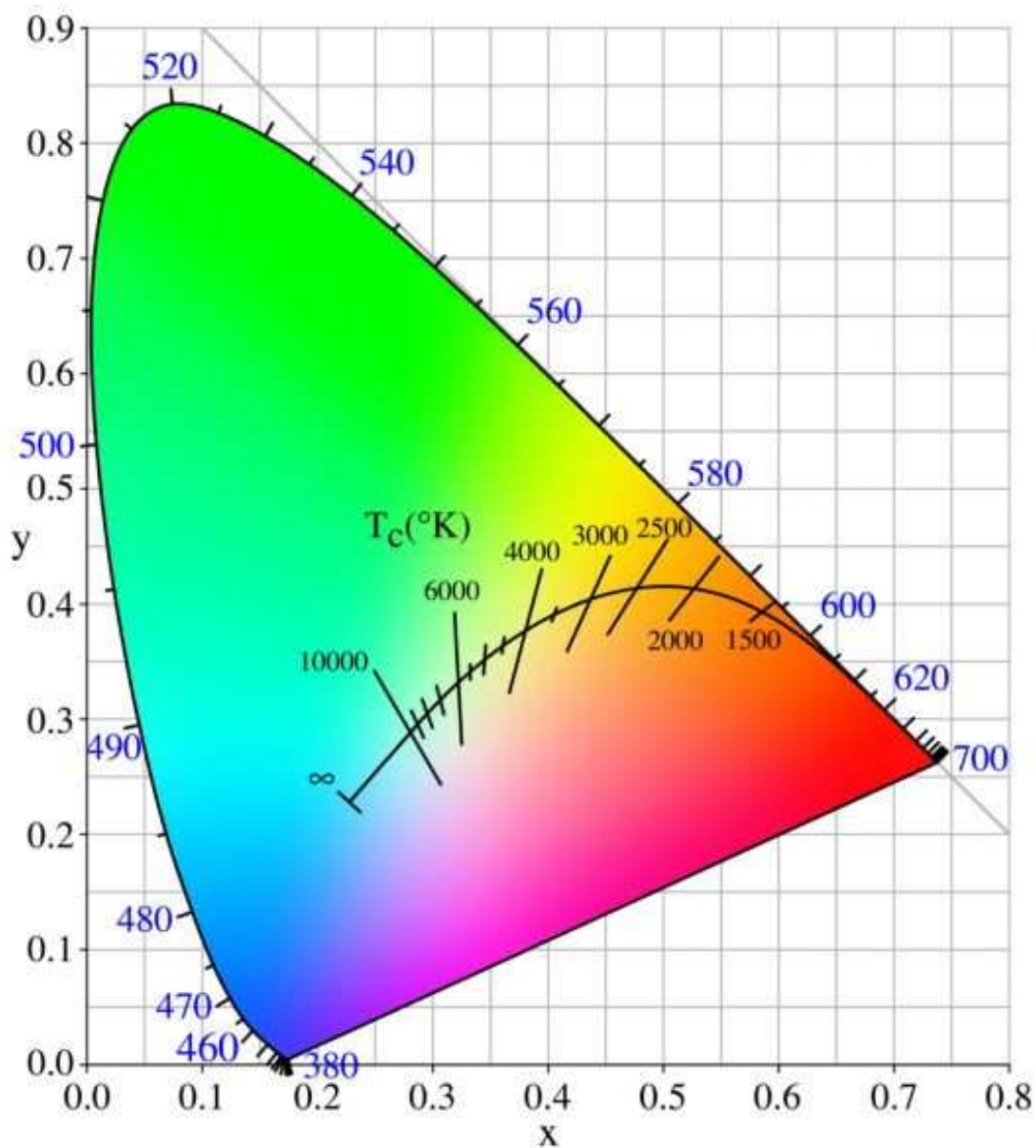
Obrázek 18: Náčrt trojúhelníku barev v rovině  $X+Y+Z=1$  kolorimetrického prostoru XYZ

Hodnotí-li se barevné podněty pouze z hlediska tónu a sytosti bez ohledu na intenzitu, tj. na hodnotu světelného toku či jasů, stačí k jejich znázornění rovinný diagram. Obvykle se pracuje s průmětem zmíněné jednotkové roviny ( $X + Y + Z = 1$ ) do souřadnicové roviny xy.

*Trichromatické souřadnice* (obvykle se značí malými písmeny, tj. např.  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) jsou rovny podílu trichromatických složek a jejich součtu. Tedy např.

$$\begin{aligned} x &= X/(X + Y + Z) \\ y &= Y/(X + Y + Z) \\ z &= Z/(X + Y + Z) \end{aligned} \tag{4.5}$$

Přitom platí, že součet trichromatických souřadnic je roven 1, tj. např.  $x + y + z = 1$ . Stačí tedy běžně pracovat pouze se dvěma souřadnicemi (např.  $x, y$ ). Normální trojúhelník barev (*diagram chromatičnosti*) CIE v pravouhlých souřadnicích  $x, y$  je nakreslen na obr. 18 [4]



Obrázek 19: Diagram chromatičnosti kolorimetrické soustavy XYZ v pravouhlých souřadnicích  $x, y$

### 4.3 Barevný prostor CIE 1976 ( $L^*a^*b^*$ )

V dnešní době se spíše provádí konverze X, Y, Z trichromatických hodnot do prostoru CIELAB, který více odpovídá způsobu vnímání barev lidským okem. Tento prostor se často označuje přívlastkem uniformní, který vyjadřuje, že číselné hodnotě barvové odchylky odpovídá stejný vizuální počitek bez ohledu na polohu barvy v barvovém prostoru. [8]

Prostor CIELAB je definován následovně:

$$L^* = 116 \cdot \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad (4.6)$$

$$a^* = 500 \cdot \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (4.7)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (4.8)$$

Výše uvedené platí dle [20], jestliže  $X/X_n > 0,008856$ ,  $Y/Y_n > 0,008856$  a  $Z/Z_n > 0,008856$ . Jestliže  $X/X_n \leq 0,008856$ ,  $Y/Y_n \leq 0,008856$  a  $Z/Z_n \leq 0,008856$ , potom platí následující rovnice dle [12].

$$L^* = 903,3 \cdot \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \quad (4.9)$$

$$a^* = 500 \cdot \left[ f \cdot \left( \frac{X}{X_n} \right) - f \cdot \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \right] \quad (4.10)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[ f \cdot \left( \frac{Y}{Y_n} \right) - f \cdot \left( \frac{Z}{Z_n} \right) \right] \quad (4.11)$$



Kde platí:

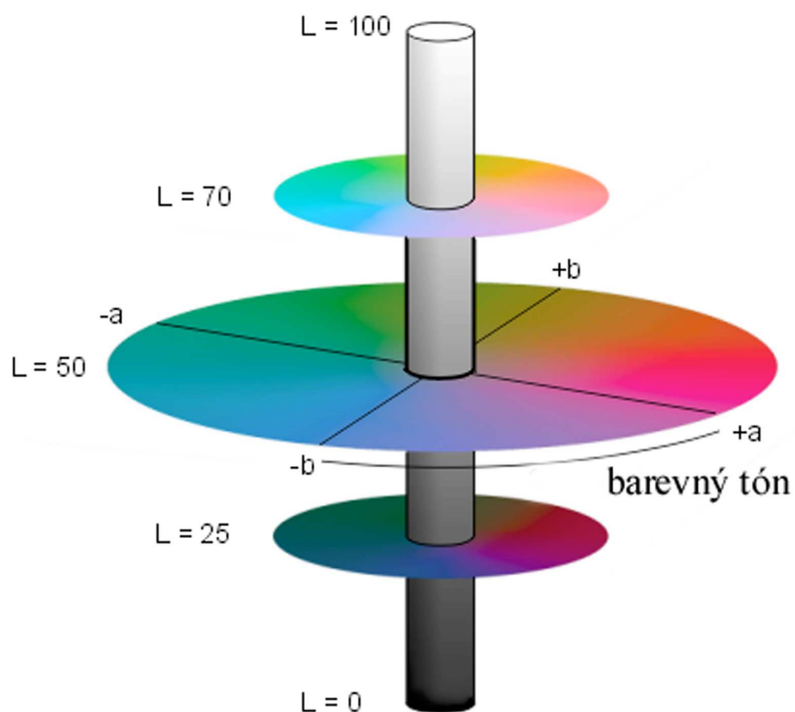
$$f \cdot \left( \frac{X}{X_n} \right) = 7,87 \cdot \left( \frac{X}{X_n} \right) + \frac{16}{116} \quad (4.12)$$

$$f \cdot \left( \frac{Y}{Y_n} \right) = 7,87 \cdot \left( \frac{Y}{Y_n} \right) + \frac{16}{116} \quad (4.13)$$

$$f \cdot \left( \frac{Z}{Z_n} \right) = 7,87 \cdot \left( \frac{Z}{Z_n} \right) + \frac{16}{116} \quad (4.14)$$

Kde  $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$  jsou trichromatické hodnoty referenční barvy.

Tyto hodnoty pro smluvně určené zdroje vytvářejí tří dimenzionální prostor (Obr. 19), který je charakterizován třemi navzájem kolmými osami –  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ . Osa  $L^*$  vyjadřuje jak je barva světlá. Souřadnice  $a^*$ ,  $b^*$  definují barevný odstín. Osa  $a^*$  reprezentuje červeno-zelené odstíny, osa  $b^*$  žluto-modré odstíny.



Obrázek 20: Prostor CIE  $L^*a^*b^*$  [9]

Barvový model  $L^*a^*b^*$  je analogický se způsobem, jakým barvy vnímáme. Ačkoli jsou v oku tři druhy čípků citlivé ke krátkým, středním a dlouhým vlnovým délkám, nejsou do mozku přenášeny přímo signály R, G, B, jak by se mohlo zdát. V gangliových buňkách dochází k jejich zpracování – zakódování do signálu červeno-zeleného, žluto-modrého a achromatického (jasového). Charakterizace barev v barevném prostoru  $L^*a^*b^*$  pomocí červeno-zelené, žluto-modré a jasové složky je tak podobná způsobu zpracování barevné informace okem. [8]











Z chromatických souřadnic  $a^*$  a  $b^*$  prostoru CIELAB lze vypočítat veličiny, které jsou intuitivní, protože odpovídají lidskému pojetí tvorby barev. Je to měrná čistota - chroma  $C^*_{ab}$  (sytnost) a měrný úhel barevného tónu - hue  $h^{\circ}_{ab}$  (barevný tón, odstín).

$$C^*_{ab} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad [-; -, -] \quad (4.15)$$

$$h^{\circ}_{ab} = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad [^{\circ}; -, -] \quad (4.16)$$

Měrná čistota barvy určuje vzdálenost od středu chromatické roviny  $a^*b^*$ , odstín udává úhel ve stupních v rovině  $a^*b^*$ , počátek je na kladné poloose  $a^*$  (červená  $0^{\circ}$ ), další poloosy odpovídají následujícím barvám:  $b^*$  (žlutá  $90^{\circ}$ ),  $-a^*$  (zelená  $180^{\circ}$ ),  $-b^*$  (modrá  $270^{\circ}$ ). [9]

**Tab. 2:  $L^*a^*b^*$  hodnoty pro základní barevné vzory [13]**

Název vzorku	$L^*$	$a^*$	$b^*$	Barva vzorku
XTCS01*	40,9	51,0	26,3	
XTCS02*	61,1	28,8	57,9	
XTCS03*	81,6	-4,2	80,3	
XTCS04*	72,0	-29,4	58,9	
XTCS05*	55,7	-43,4	35,6	
XTCS06*	51,7	-26,4	-24,6	
XTCS07*	30,0	23,2	-49,6	
XTCS08*	51,0	47,3	-13,8	
XTCS09*	68,7	14,2	17,4	
XTCS10*	63,9	11,7	17,3	

Barevný prostor CIELAB umožňuje také výpočet objektivních odchylek  $\Delta E^*_{ab}$  mezi jednotlivými barvami a jejich vzory uvedenými v Tab. 2 z odchylek jasů  $\Delta L^*$  a odchylek chromatických souřadnic  $\Delta a^*$  a  $\Delta b^*$  a to pomocí vztahu:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4.17)$$

Rozdíl barev  $\Delta E^*_{ab}$  představuje důležitou, obecně uznávanou metodu hodnocení rozdílů barev. Pomocí této hodnoty lze spočítat specifický index podání barev při použití vztahu uvedeného v [7]:

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E^*_{ab} \quad (4.18)$$

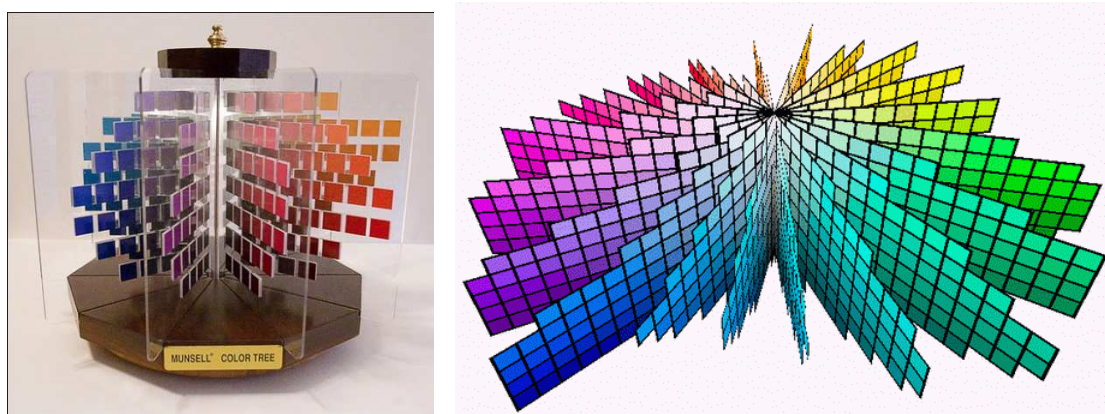
Všeobecný index podání barev  $R_a$  se následně získá aritmetickým průměrem. Při použití základních osmi vzorků barev bude výsledný vztah vypadat:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (4.19)$$

#### 4.4 Další způsoby barevné specifikace

Kolorimetrické soustavy jsou pro reprodukce barev v praxi obtížně využitelné, neboť realizace světla nebo barevných vzorků podle jejich trichromatických souřadnic či složek je bez speciální techniky velmi obtížná. Proto byly v některých zemích vypracovány atlasy barev, což jsou obecné vzorníky barev natištěné na papírových nebo plastových podložkách.

Jedním z nejznámějších atlasů barev je Munsellův atlas, používaný ve světelné technice k určování kolority (barev) předmětů pozorovaných v denním světle. Barevné vzorky jsou v tomto prostorovém systému určeny třemi údaji: barevným tónem (hue), světlostí (value) a sytostí (chroma). Každý z uvedených parametrů má svou stupnici hodnot (obr. 20) [5]



Obrázek 21: Munsellův atlas

Tab. 3: Veličiny pro určení světlosti barvy

Stupeň světlosti barvy podle Munsella	Činitel odrazu povrchu (%)
10,0	100,0
9,5	87,8
9,0	76,7
8,5	66,7
8,0	57,6
7,5	49,4
7,0	42,0
6,5	35,3
6,0	29,3
5,5	24,0
5,0	19,3
4,5	15,2
4,0	11,7
3,5	8,8
3,0	6,4
2,5	4,5
2,0	3,0
1,5	2,0
1,0	1,2
0,0	0,0

Světlost barvy, která je vlastně jasností barvy v rovnoměrné fyziologické stupnici, se vystihuje podle Tab. 3 číslem v rozmezí od 0 do 10 (0 = černá, 10 = bílá) v závislosti na činiteli odrazu povrchu daného vzorku.

Sytost barvy se v tomto případě charakterizuje podle podílu bílé nepestré barvy v daném barevném vjemu a označuje se počtem barevných odstínů ležících mezi daným barevným vzorkem a příslušnou nepestrou barvou.

Stupnice jsou voleny tak, aby v podmínkách denního osvětlení bylo dosaženo rovnoměrných vzdáleností při subjektivním vnímání rozdílu barvy, změní-li se světlost o jeden stupeň, sytost o dva stupně a barevný tón o tři stupně. Z toho důvodu je počet stupňů sytosti rozdílný pro různé barevné tóny. Počet rozlišitelných barev mezi nepestrou bílou a sytou barvou při stejné jasnosti závisí na barevném tónu; např. je větší pro žlutou a červenou než pro modrou. Kromě toho je třeba vzít v úvahu, že se Munsellův systém týká pouze barev (kolorit) povrchů, a proto počet stupňů ve škále sytosti závisí také na světlosti. [5]

## **4.5 Podání barev**

Vjem barvy určitého předmětu je v zásadě podmíněn jednak spektrálním složením záření zdroje osvětlujícího předmět, jednak spektrálním činitelem odrazu či prostupu pozorovaného předmětu. Vjem barvy je však ovlivněn i samotným zrakem, a to s ohledem na různou citlivost k jednotlivým barvám i s ohledem na stav adaptace zraku podle převládajícího druhu osvětlení zorného pole. Vzhledem k dlouholetému zvyku člověka na barevný vzhled předmětů v denním (přírodním), ale také žárovkovém světle se tato okolnost často stává i vžitou představou a vjem barvy předmětu v přírodním, resp. žárovkovém světle se běžně považuje za normální. Proto při pozorování předmětů ve světle výbojových zdrojů může dojít ke značnému zkreslení vjemu barev osvětlovaných předmětů. Problémy vznikají v rozlišování barev a zejména v přizpůsobení barvy vyráběného předmětu barvě standartu, a to jak v běžném životě, tak i v obchodě a průmyslové výrobě.

Vliv spektrálního složení světla zdrojů na vjem barvy osvětlených předmětů charakterizuje *podání barev*. Vjem barvy se přitom vědomě či nevědomě srovnává s jejich vzhledem ve světle smluvního či obvyklého zdroje světla. Při takto pojatém hodnocení barev se

v souladu s doporučením Mezinárodní komise pro osvětlování neuvažují ani estetické, ani psychologické vlivy. K číselnému ocenění jakosti podání barev se využívá *index podání barev*, který vyjadřuje stupeň shodnosti vjemu barvy předmětů osvětlených uvažovaným zdrojem a barvy týchž předmětů osvětlených smluvním zdrojem světla za stanovených podmínek. Metoda hodnocení je založena na číselném vyjádření rozdílu vjemu barvy vybraného souboru, popř. až čtrnácti barevných vzorků při postupném osvětlení uvažovaným a smluvním zdrojem. Výpočtem se stanovuje *všeobecný index podání barev*  $R_a$ . Pro podrobnější hodnocení se někdy stanovují pro každý barevný vzorek zvlášť *speciální indexy podání barev*  $R_1, R_2, R_3$  atd. Řada barevných vzorků se pro tento účel může rozšířit až na čtrnáct vzorků. Rozdíl vjemu barvy vzorku ve světle smluvního a zkoušeného zdroje se odvozuje od porovnání vzdálenosti  $\Delta E_i$  bodů popisujících oba barevné vjemy ve starším rovnoměrném diagramu chromatičnosti  $(u, v)$ , popř. v rovnoměrném kolorimetrickém prostoru CIE 1960, popř. 1964 (UVW). Všeobecný index podání barev  $R_a$  se určí ze vztahu

$$R_a = 100 - 4,6\Delta\bar{E}_a \quad (4.20)$$

Speciální index podání barev  $R_i$  vzorku  $i$  se počítá z rovnice

$$R_i = 100 - 4,6\Delta\bar{E}_i \quad (4.21)$$

V rovnicích (4.1) a (4.2) značí

$$\Delta\bar{E}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_i \quad (4.22)$$

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{oi} - U_{ki})^2 + (V_{oi} - V_{ki})^2 + (W_{oi} - W_{ki})^2} \quad (4.23)$$

kde jsou

$U_{oi}, V_{oi}, W_{oi}$  trichromatické složky popisující v soustavě UVW barevný vjem  $i$ -tého vzorku ( $i = 1, 2, 3 \dots 8$ ) při osvětlení srovnávacím zdrojem,

$U_{ki}, V_{ki}, W_{ki}$  trichromatické složky popisující v soustavě UVW barevný vjem  $i$ -tého vzorku při osvětlení zkoušeným zdrojem,

$n$  počet použitých barevných vzorků (obvykle osm nebo čtrnáct)

Pro práci s trichromatickými souřadnicemi lze s uvažováním vlastností barevných vzorků rovnici (4.23) upravit do tvaru:

$$\Delta E_i = 800 \times \sqrt{\left[ (u_{oi} - u_o) - (u_{ki} - u_k) \right]^2 - \left[ (v_{oi} - v_o) - (v_{ki} - v_k) \right]^2} \quad (4.24)$$

$u_o, v_o$  souřadnice bodu popisujícího chromatičnost světla srovnávacího zdroje v diagramu  $u, v$ ,

$u_k, v_k$  souřadnice bodu popisujícího chromatičnost světla zkoušeného zdroje v diagramu  $u, v$ ,

$u_{oi}, v_{oi}$  souřadnice bodu popisujícího v diagramu  $u, v$  barevný vjem  $i$ -tého zkušební vzorku ( $i = 1, 2$  až  $8$ ) osvětleného srovnávacím zdrojem,

$u_{ki}, v_{ki}$  souřadnice bodu popisujícího v diagramu  $u, v$  barevný vjem  $i$ -tého vzorku osvětleného zkušebním zdrojem,

Dosavadní metoda hodnocení podání barev indexem  $R_a$  je založena na předpokladu, že teplota chromatičnosti světla srovnávacího a zkoušeného zdroje se liší nejvýše o  $5 \text{ MK}^{-1}$ . To např. odpovídá při teplotě 3000 K rozdílu asi 50 K, ale při 7400 K již rozdílu 250 K. Při náhradní teplotě chromatičnosti do 5000 K se jako srovnávací zdroj používá černý zářič, tedy teplotní zdroj. Pro zdroje s náhradní teplotou chromatičnosti nad 5000 K se za srovnávací zdroj využívá zdroj se spektrálním složením odpovídajícím smluvnímu bílému světlu D a některé fázi přírodního světla.

Hodnota indexu podání barev  $R_a$  může být v rozmezí od 0 do 100. Ve světle teplotních zdrojů a v přírodním (denním) světle se barvy předmětů vnímají nejvěrněji, čemuž odpovídá  $R_a = 100$ . Naopak v monochromatickém žlutém světle nízkotlakých sodíkových výbojek se barvy nedají rozlišit, a tedy  $R_a = 0$ . V současnosti se ve většině interiérů požaduje  $R_a > 80$ . [5]

## 4.6 Měření indexu podání barev

Měření je uskutečněno přístrojem AvaSpec-2048 z výše uvedených důvodů. Jeho vybavení umožňuje měření indexu dvěma různými způsoby:

- Měření v  $L^*a^*b^*$
- Měření „CRI“

### 4.6.1 Měření v systému $L^*a^*b^*$

Spektrofotometr AvaSpec-2048 je schopen změřit barvy v soustavě  $L^*a^*b^*$ . Jde o metodu, která se využívá např. v textilním průmyslu, materiálovém inženýrství apod. Metoda je založena na měření a porovnávání vzorků barev z tabulkou  $L^*a^*b^*$  základních barevných vzorků, která je mezinárodní dohodou určena.

Získání indexu podání barev za pomoci této metody lze za jistých podmínek. Pokud bychom nechali osvětlovat měřeným zdrojem barevné plochy stejných barev jako jsou v tabulce  $L^*a^*b^*$  barevných vzorků, a jejich výsledné naměřené údaje (každé plochy zvlášť) substituční metodou vyhodnotili, mohli bychom dostat výsledný index podání barev. Avšak je zbytečné rozebírat problematiku substituce osvětlených barevných ploch, pokud chceme měřit samotný zdroj. Nejen že je tato metoda zbytečně komplikovaná a nepřesná, ale je to hlavně metoda nepřímého měření.

### 4.6.2 Měření „CRI“

Měření „CRI“ (Color rendering index) je přímé měření indexu podání barev. Vyhodnocují se vzorky z naměřené spektrální charakteristiky. Ze spektrální charakteristiky měřeného zdroje se selektuje 14 vzorků intenzity vyzařování  $\Delta E_{CRI}$ , z kterého se přepočte  $R_i$  (viz. výše) a sumou všech hodnot vzorků vychází index podání barev.



$$R_a = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} R_i \quad (4.25)$$

K tomuto měření se používají údaje z kalibračního zdroje. Kalibrační zdroj doplní charakteristiku o data v oblasti vlnových délek mimo viditelné záření. U zařízení firmy Avantes kalibrační data v neviditelné oblasti dosahují i záporných hodnot a z tohoto důvodu je chybně vyhodnocen index podání barev u monochromatických zdrojů také v záporných hodnotách.

## 5 Ulbrichtova koule (kulový integrátor)

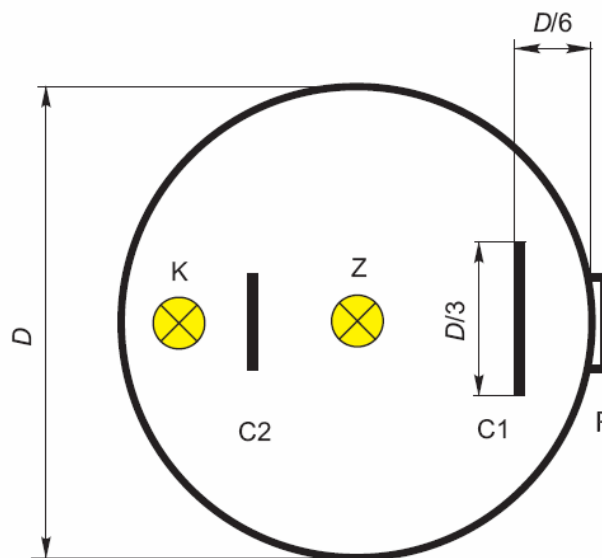
K měření světelných veličin ve světelné technice slouží, mimo samotné měřicí přístroje, i konstrukce, které usnadňují nebo přímo umožňují měřitelnost potřebné veličiny. Mezi takové konstrukce patří nejrůznější soustavy zrcadel a čoček, jinými slovy optická technika, ale i systémy stínítek a ramen pro uchycení měřeného elementu, či měřícího přístroje a v neposlední řadě konstrukce, které jsou třeba i složitější a nesou specifický název tzv. terminus technicus. Mezi takové patří např. fotometrická lavice, kosinův nástavec a nebo Ulbrichtova koule tzv. kulový integrátor.

### 5.1 Měření v Kulovém integrátoru

V kulovém integrátoru lze měřit světelný tok pomocí normálu světelného toku a také osvětlenost, kterou ze světelného toku a známého průměru integrátoru lze dopočítat. Integrátor může mít tvar krychle nebo kvádra, ale nejvhodnější (zvláště při nesymetrickém rozdělení světelného toku) jsou integrátory ve tvaru koule podle obr. 4.12.

Jde o dutou kouli na vnitřním povrchu opatřenou bílým rozptylným nátěrem s vysokým činitelem odrazu. Důležitým požadavkem je, aby byl nátěr barevně neselektivní. Nejlépe vyhovují některé druhy běloby zinkové, titanové či barytové. Často bývá základní nátěr trvalý a na něj je nanesen nátěr rozpustný ve vodě, který se pravidelně obnovuje. Činitel odrazu by měl být v mezích 0,75 až 0,85. Koule má na jedné straně okénko s fotočlánkem zastíněné clonkou, aby na něj nedopadalo světlo přímo ze zdroje. Zdroj je zavěšen přibližně ve středu koule. Při rozsvícení zdroje uvnitř koule vznikají mnohonásobné odrazy na vnitřním povrchu koule.

S ohledem na difuzní charakter vnitřního povrchu integrátoru je teoreticky výsledná osvětlenost ve všech bodech vnitřního povrchu koule stejná a její hodnota se měří fotočlánkem.



Obrázek 22: Náčrtek kulového integrátoru

Dopadá-li na vnitřní povrch integrátoru ze zdroje Z tok  $\Phi_Z$  a má-li rovnoměrně rozptýlně odrážející povrch integrátoru integrální činitel odrazu  $\rho$ , je odražená složka výsledného světelného toku  $\Phi$  dopadající vlivem mnohonásobných odrazů na vnitřní povrch integrátoru rovna

$$\phi = \rho\phi_Z + \rho^2\phi_Z + \rho^3\phi_Z + \dots + \rho^n\phi_Z = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \phi_Z \quad (5.1)$$

Vnitřní povrch kulového integrátoru je ve všech místech stejně osvětlen a osvětlenost v libovolném bodě tečné roviny k vnitřnímu povrchu integrátoru je rovna střední hodnotě osvětlenosti celého vnitřního povrchu  $\pi D^2$  kulového integrátoru o průměru  $D$ .

V místě okénka s měřicím čidlem odpovídá osvětlenost  $E$  pouze odraženým světelným tokům, tj. toku  $\Phi$ , a stanoví se ze vztahu

$$E = \frac{\phi}{\pi D^2} = \frac{\rho}{\pi D^2 \cdot (1-\rho)} \cdot \phi_Z = k_i \cdot \phi_Z \quad (\text{lx; lm, m; m, lm; lm}) \quad (5.2)$$

kde  $k_i$  je konstanta integračního fotometru

$$k_i = \frac{\rho}{\pi D^2 \cdot (1 - \rho)} \quad (\text{m}^{-2}; \text{m}) \quad (5.3)$$

Fotočlánek tedy indikuje hodnotu osvětlenosti  $E$ , která je přímo úměrná toku zdroje  $\Phi_z$ . Z rovnice (5.2) je patrné, že citlivost integračního kulového fotometru ovlivňuje jeho průměr  $D$  a činitel rovnoměrně rozptýlného odrazu  $\rho$ .

Obvykle se měří substituční objektivní metodou. Nejprve se umístí do integrátoru normál světelného toku a stanoví se konstanta zařízení. Pak se normál vyjme a místo něho se do koule umístí měřený zdroj. Údaj fotometru násobený konstantou zařízení udává světelný tok měřeného zdroje.

Jestliže se měří v integrátoru světelný tok celého svítidla nebo zdroje s většími nosnými částmi, dochází k určitému pohlcení a odstínění části světelného toku. V takovém případě je vhodné použít pro vyloučení stínícího vlivu pomocnou žárovku, zvanou korekční zdroj  $K$  (obr. 20). Ten bývá umístěn u stěny koule obvykle naproti výstupnímu okénku, přičemž je zakryt clonou  $C_2$ , aby neosvětloval přímo výstupní okénko ani měřený zdroj či svítidlo. Je vhodné, aby se světelný tok pomocné žárovky příliš nelišil od světelného toku měřeného zdroje, a musí být konstantní po dobu jednoho měření.

Postup měření s korekčním zdrojem je tento:

1. při rozsvíceném normálu a zhasnutém korekčním zdroji se na přístroji přečte údaj  $E_N$ ,
2. při zhasnutém normálu a rozsvíceném korekčním zdroji – údaj  $E_{KN}$ ,
3. při zhasnutém měřeném zdroji a rozsvíceném korekčním zdroji – údaj  $E_{Kx}$ ,
4. při rozsvíceném měřeném zdroji a zhasnutém korekčním zdroji – údaj  $E_x$ .

Je-li světelný tok normálu  $\Phi_N$ , světelný tok měřeného zdroje  $\Phi_x$  se vypočítá ze vztahu

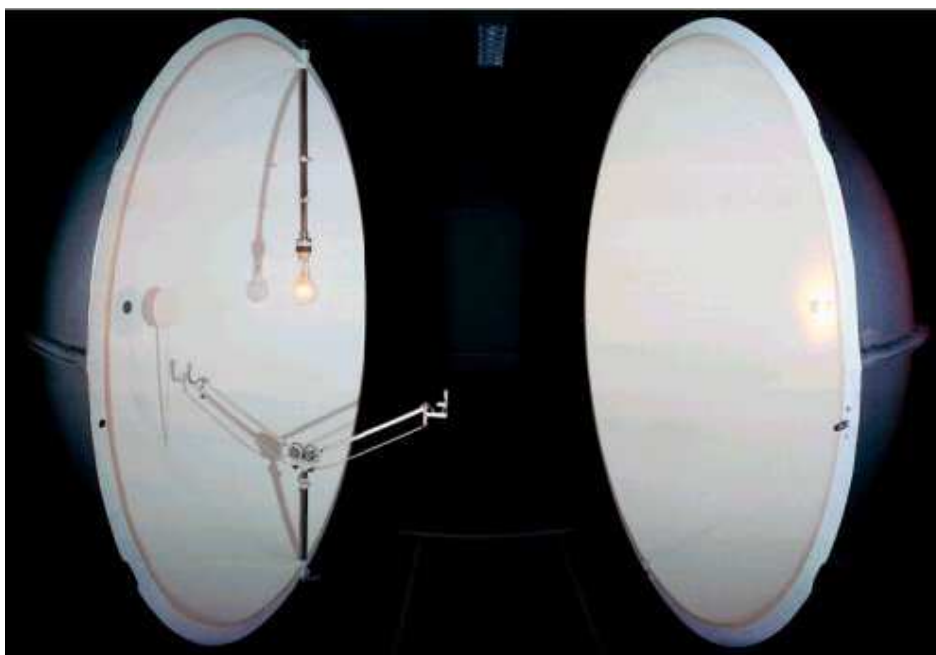
$$\phi_x = \phi_N \frac{E_x \cdot E_{KN}}{E_N \cdot E_{Kx}} \quad (\text{lm}; \text{lm}, \text{lx}, \text{lx}, \text{lx}, \text{lx}) \quad (5.4)$$

Ve vztahu (5.4) představuje poměr  $E_{KN}/E_{Kx}$  korekci vlivu stínění neaktivních částí.

Obdobným postupem se může v integrátoru změřit i světelný tok svítidla. Pak je možné stanovit též účinnost svítidla jako poměr světelného toku vyzařovaného svítidlem ke světelnému toku zdrojů instalovaných ve svítidle.

Před začátkem měření světelného toku je třeba světelný zdroj nechat určitou dobu zahořet, aby se ustálily jeho světelnotechnické parametry. U výbojových zdrojů je tato doba dvacet i více minut.

Přesnost měření světelného toku v integrátoru je ovlivněna jednak vlastnostmi fotočlánku (závislost fotoproudu na osvětlenosti), jednak změnami teploty uvnitř integrátoru při déletrvajících měřeních. Linearita fotočlánku se má pravidelně kontrolovat a je třeba počítat s korekčními křivkami; vliv teplotních změn lze omezit tím, že se světelný zdroj zahořuje při otevřeném integrátoru a integrátor se zavírá na dobu vlastního měření. Vlastnosti vnitřního nátěru integrátoru se rovněž časem poněkud mění, což by mohlo mít vliv u dlouhotrvajících měření (např. zkoušky životnosti zdrojů). Také výstupní okénko musí vyhovovat určitým požadavkům, např. jeho umístění se má kryt co nejpřesněji s vnitřním povrchem integrátoru. Rovněž clony, které brání přímému dopadu světla na fotočlánek, mají mít určité geometrické rozměry, např. clona  $C_1$  má mít průměr asi  $D/3$  a její vzdálenost od výstupního okénka má být  $D/6$ , kde  $D$  je průměr integrátoru. [3]



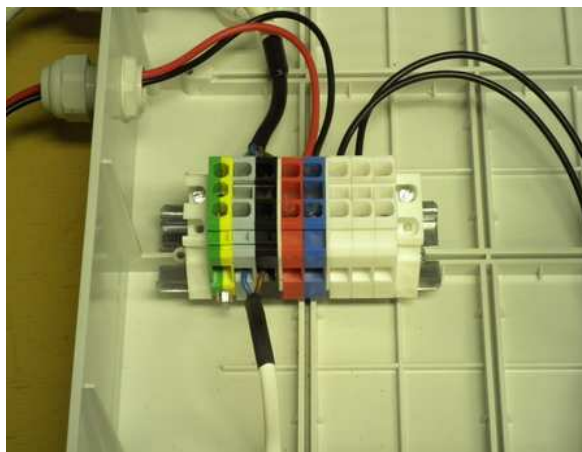
Obrázek 23: Příklad kulového integrátoru

## 5.2 Návrh a výroba kulového integrátoru o průměru 40cm

Jak už bylo uvedeno, kulový integrátor je dutá koule s vnitřním povrchem o vysoké odraznosti, s otvorem pro měřicí přístroj spolu ze stínítkem a otvorem pro instalaci světelného zdroje (myšleno přívod napájení) popř. korekčního svítidla také ze stínítkem. Pro laboratoř VŠB-TU Ostrava bylo zapotřebí vyrobit tuto konstrukci o velikosti 40 centimetrů, ačkoli už laboratoř je vybavena dvěma kulovými integrátory (3 metry a cca 40 mm). Střední kompromis (40 cm) mezi stávajícími koulemi byl zvolen z důvodů rozšiřujících se nabídek výkonových světelných diod na trhu. Avšak nejen diody lze měřit v této kouli, ale i malé halogenové žárovky, malé standardní žárovky, malé diodové svítidla apod.

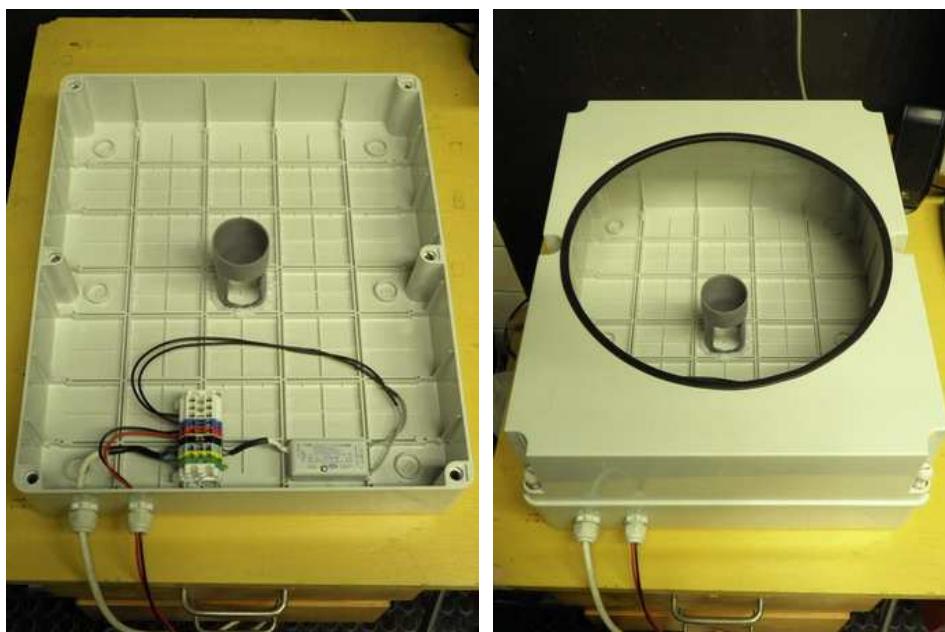
### Základna kulového integrátoru

Protože konstrukce kulového integrátoru je tvaru koule, bylo zapotřebí zvolit způsob upevnění pro lepší stabilitu. Jako modul byla použita rozvodná skříň GW 44 421 s rozměry 460x380x180 vybavená dvěma průchodkami PG 13,5 mm a PG 11 mm, elektroinstalační lištou DIN se svorkami RSA pro alternativní připojení síťového napětí, stejnosměrného napětí a pomocných obvodů (viz obr. 22).



Obrázek 24: Zabudované svorky RSA na elektroinstalační liště DIN

Do víka skříně byl vykroužen kruhový otvor o průměru 320 mm, do kterého byl kulový integrátor vsazen. Aretace nakonec byla provedena trubicí z izolačního materiálu o průměru 50 mm, která byla opatřena servisním otvorem (viz obr. 23).



Obrázek 25: Otevřená a uzavřená skříň základny integrátoru

### Polokoule kulového integrátoru

Byly opatřeny dvě polokoule o poloměru 20 cm, které byly vylišované z hliníkového plátu o tloušťce 2mm. Bylo zapotřebí provést povrchovou úpravu, aby mohly být nanесeny vrstvy barev dle normy ČSN 36 0010 (viz přílohy). Jde sice o starší vydání normy, avšak stále platné. Vnitřní nátěr polokoulí se měl skládat ze tří vrstev:

1. Základní nátěr – byla zvolena syntetická barva bílého odstínu, základová, 3 nátěry
2. Bílý podkladový nátěr – zvolena barva Latex, vysoce stěru odolná bílého odstínu, podkladová, 7 nátěrů
3. Bílý vrchní nátěr – použitý doporučený roztok síranu barnatého, roztok čistě bílý, barevně neselektivní, vysoce náchylný, počet nátěrů není přesně definovatelný

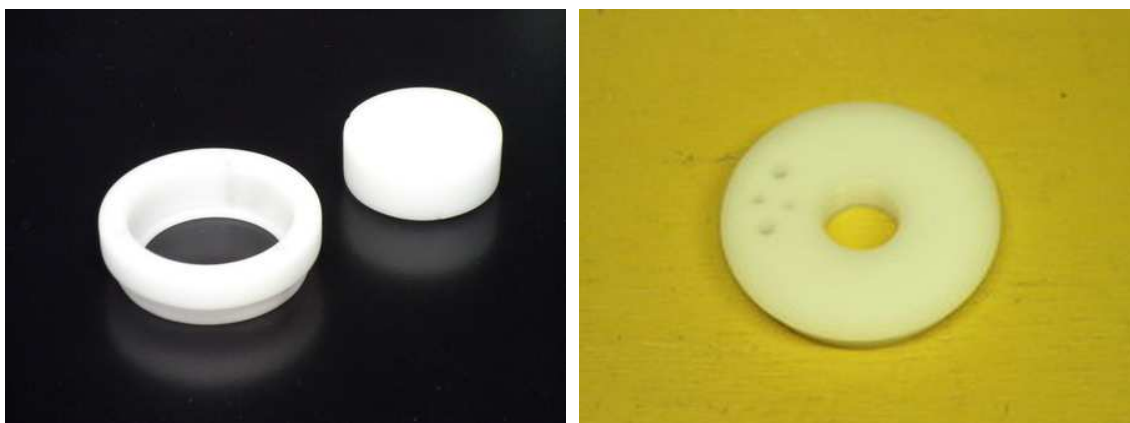
Poslední nátěr byl vytvořen roztokem síranu barnatého dle normy. Nanášení nátěrů bylo problematické právě pro specifikum této hmoty. Roztok nekryje, bobtná, krabátí se a po několikáté vrstvě se odlepuje. Právě proto není uvedeno počet vrstev, protože mnohé místa povrchu polokoulí bylo zapotřebí přetírat, brousit a znovu přetírat. Vnější nátěr polokoulí byl opatřen černou, matnou barvou čistě z laboratorních důvodů. Lem, neboli místo dotyku polokoulí, byl opatřen těsnicí páskou (viz obr. 24).



Obrázek 26: Spodní a horní polokoule integrátoru

### Redukční kroužky otvorů kulového integrátoru

Otvory v obou polokoulích měli rozměr 45 mm. A protože přístroje používané k měření mají rozměry odlišné, bylo zapotřebí zhotovit redukce. Byly vytvořeny dva redukční kroužky pro sondy měřících přístrojů (Luxmetr a Spektrofotometr), a jeden průchodný kroužek pro korekční zdroj a přívod napájení k zdroji měřenému (viz obr. 25).



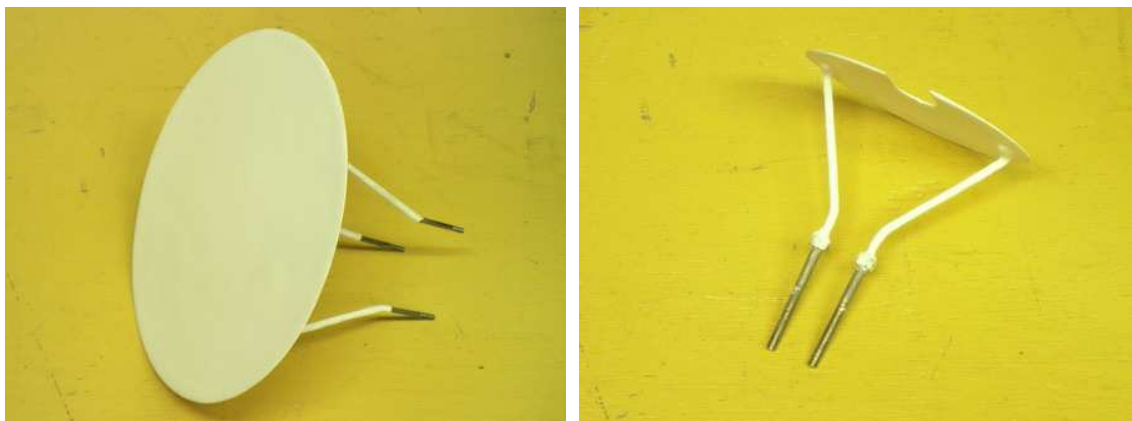
Obrázek 27: Redukční kroužky horní a průchodka (kroužek horní)

### Clony a distanční trubice

Clony pro měřící přístroj a korekční svítidlo, byly vytvořeny v požadovaných poloměrech, tedy 66mm a 33mm, a opatřeny stejným nátěrem, jako vnitřní povrch polokoule. Přichyceny byly pomocí drátěných noh k redukčním kroužkům. Trubice o průměru 10 mm,



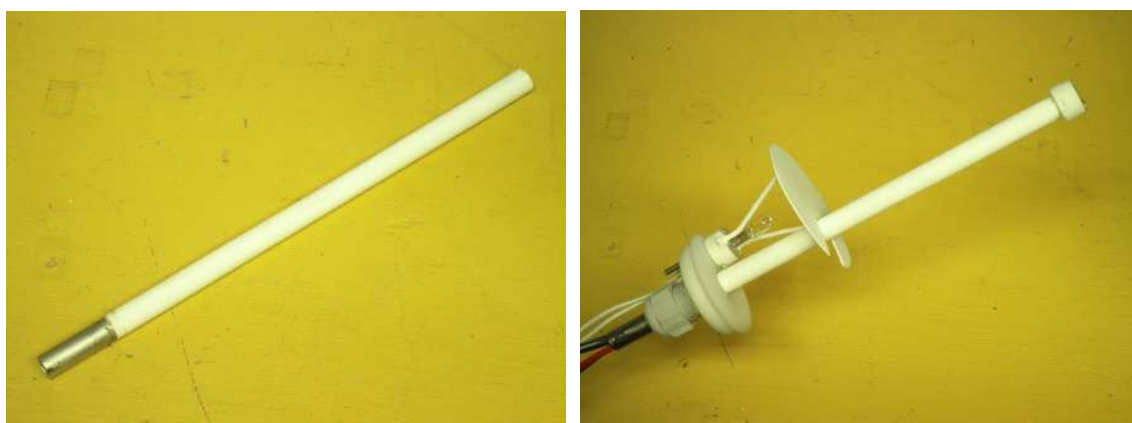
kterou je přivedenou napájení měřeného zdroje, má výšku až 23 cm tak, aby bylo možné měřený objekt instalovat ve středu koule. A opět i trubice je opatřena nátěrem dle normy (viz obr. 26).



**Obrázek 28: Clona snímače a clona korekční žárovky**

### **Kompletní sestava**

Pro korekční zdroj světla byla zvolena patice GY4, protože korekčním zdrojem je halogenová žárovka pasující právě do takové patice. K průchodnému kroužku byla, kromě korekčního zdroje a stínítka připevněna průchodka PG 13,5 mm, do které zapadá distanční trubice, a díky které trubici lze nastavovat na požadovanou výšku. Tato menší sestava zapadá do otvoru spodní polokoule (viz obr. 27).



**Obrázek 29: Distanční trubice a celá soustava k upevnění s korekční žávkou**

Na distanční trubici lze dále upevňovat nejrůznější druhy patic pro instalaci měřeného zdroje. Korekční kroužky zapadají do otvoru horní polokoule, a polokoule se přiklopí na sebe a uzavřou třemi šrouby v otvorech, které jsou v nezaměnitelné poloze. Koule se pak usadí v rozvodné skříni tak, aby spodní otvor zapadl do aretace. Přívodní napájení se protáhne trubicí a servisním otvorem a uchytí se na svorkách skříně. Průchodkou se přivede napájecí napětí, popř. napětí z usměrněného zdroje. Napětí pro korekční žárovku transformuje elektrický transformátor 230V/11,5V. Konstrukční části jsou ve výkresovém zpracování přiložené na konci dokumentu.



**Obrázek 30: Kulový integrátor 40 cm**

## 6 Měření vybraných spektrálních vlastností světelných zdrojů v laboratořích VŠB TU Ostrava

Měření probíhalo v měsíci Dubnu 2010 v laboratořích VŠB-TU v Ostravě, v budově „L“, v místnosti 02. Prováděli se tři skupiny měření:

- Měření světelného toku
- Měření spektrálních charakteristik
- Měření indexu podání barev, teploty chromatičnosti a kolorimetrického trojúhelníku

U každého měření se měnili různé světelné zdroje, popř. svítidla. Ve zkratce je možné zdroje (svítidla) rozdělit do těchto kategorií:

- Měření LED 5mm (5 barev)
- Měření automobilových LED (5 barev)
- Měření LED svítidel (na 230V s předřadníkem a na 12V s předřadným odporem)
- Měření žárovkových zdrojů (2 žárovky, patice E10; 3 halogeny, patice GY4)

Všechna měření probíhala v kulovém integrátoru (40cm). Měření spektrálních charakteristik a spektrofotometrických veličin pomocí sondy spektrofotometru probíhalo bez korekční žárovky, měření světelného toku pak podle metody světelného normálu a korekční žárovky. Byly použity měřicí přístroje AvaSpec-2048 a luxmetr PU 550 firmy Metra Blansko.

### 6.1 Měření světelného toku

Při tomto měření se na vrchol Ulbrichtovy koule připevnila sonda luxmetru. Do koule byli postupně vkládány zdroje a svítidla, a podle potřeby měněny patice GY4, E10 aj.

Postupně se každý zdroj zapojil patící k napájení, koule se uzavřela, daný světelný zdroj se rozsvítil a na displeji luxmetru byla odečtena hodnota. Poté byl zhasnut měřený zdroj a rozsvítila se korekční žárovka. Opět byla odečtena hodnota na luxmetru. U každého měření, dle

potřeby, se vyčkalo doby plného světelného toku tzv. doby ustálení. Předem se provedlo i měření s normálem světelného toku.

### Zpracování:

**Tab. 4: Výsledky měření světelného toku**

		$E_x$ [lx]	$E_{Kx}$ [lx]	$\Phi$ [lm]
LED 5mm	bílá	172,1	693	6,65
	zelená	96,4	686	3,76
	modrá	34,8	688	1,35
	žlutá	20,8	684	0,81
	červená	16,2	685	0,63
AUTO LED	bílá	146,4	690	5,68
	zelená	80,9	695	3,11
	modrá	26,5	689	1,03
	žlutá	25,8	683	1,01
	červená	15,3	685	0,60
Žárovky	2,5V E10	42,4	683	1,66
	12V E10	458	674	18,19
	Halogen 5W	837	675	33,19
	Halogen 10W	2980	674	118,36
	Halogen 20W	6780	676	268,48
Svítidla	svítidlo 230V	4790	521	246,11
	svítidlo 12V	4780	525	243,73
	Světeln. normál	2990	667	120

### Příklad výpočtu:

Výpočet dle rovnice (5.4)

$$\phi_x = \phi_N \frac{E_x \cdot E_{KN}}{E_N \cdot E_{Kx}} = 120 \cdot \frac{4790 \cdot 667}{2990 \cdot 521} = 246,11 \text{ lm}$$

**Vyhodnocení:**

Z měření světelného toku v kulovém integrátoru lze vyhodnotit některé závěry. Například jsou zřetelné nízké úrovně světelného toku u zdrojů LED, řádově v jednotkách lumen. Naproti tomu svítidla, ve kterých jsou použity výkonové LED prvky mají světelný tok vysoký.

Rozdíl v řádech desítek lumen je poznat i u žárovek s rozdílnou hladinou napájení. Ačkoli lze tento rozdíl čekat, dokazuje výsledek, že závislost mezi napájením a světelným tokem u inkadescenčních zdrojů není lineární.

Nejzajímavější výsledek je světelný tok LED svítidel. Pokud příkon svítidla napájeného 12V je pod prahem 4W a jeho světelný tok je téměř 8krát vyšší, než u halogenového zdroje na 5W, které je také napájeno 12V, můžeme s klidem prohlásit, že výkonové LED dokáží plně nahradit inkadescenční zdroje. A to nejen hladinou světelného toku, ale i účinností.

Výsledky měření lze porovnat z katalogovými údaji, jejichž listy jsou zařazeny v přílohách.

## **6.2 Měření spektrálních charakteristik**

Měření opět probíhalo v kulovém integrátoru, avšak tentokrát se sondou spektrofotometru firmy Avantes. Opět se každý světelný zdroj (svítidlo) z předchozího měření zapojil do napájení a byl spuštěn program AvaSoft 7.4 pro zpracování spektrálních charakteristik, který slouží AvaSpecu-2048 jako softwarové rozhraní.

Postup vytvoření a zpracování charakteristik je uveden v přílohách. Nejdůležitější částí postupu bylo u každého zdroje načíst tzv. Temná data (zdroj není rozsvícen) a poté při rozsvíceném zdroji nastavit dobu skenování vhodně tak, aby se charakteristika vykreslila plně pro zpracování. V případě potřeby bylo nutné upravit souřadnicový systém, resp. rozsah os.

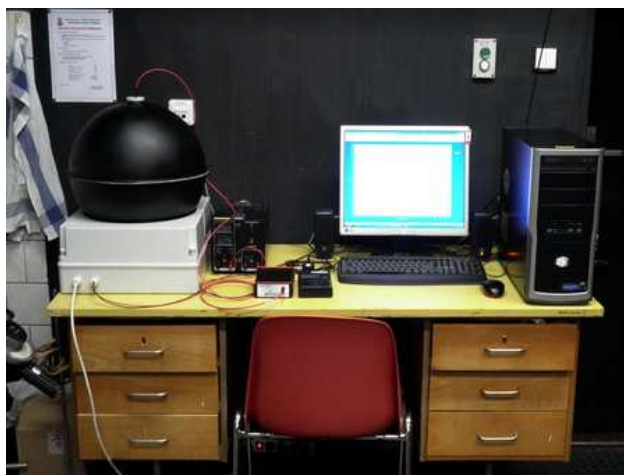
Naměřené charakteristiky jednotlivých měřených vzorků jsou přiloženy v přílohách.

**Vyhodnocení:**

Z charakteristik jsou zjevné prvky některých zdrojů. U LED zdrojů samostatné barvy nelze přehlédnout křivku monochromatického záření. Jen u bílé LED dvě vlny charakteristiky dokazují konverzi vlnových délek a komplementární vyzařování. U bílé LED 5 mm přítomný vyšší podíl modré barvy, u Auto LED zas oranžové (teplá a studená bílá). Z charakteristiky LED svítidel můžeme vyhodnotit podobný průběh, avšak poměr barev je odlišný, což ve společném součtu znamená i odlišnou barvu světla, která se pohybuje v jiných částech kolorimetrického diagramu.

Žárovkové zdroje dokazují spektrální charakteristikou opět vyzařování klasického inkandescentního zářiče. Jejich průběh je spojitý napříč téměř celým spektrem.

U mnoha charakteristik, zvláště u zdrojů z vyšším časem skenování, je zjevné zkreslení charakteristiky chybou, šumem. Je to zapříčiněno nepřímým měřením v integrační kouli. Přesto je tento způsob jednodušší a rychlejší.



**Obrázek 31: Měřicí souprava s počítačem**

### 6.3 Měření indexu podání barev, teploty chromatičnosti a kolorimetrického trojúhelníku

Poslední měření v kulovém integrátoru je téměř shodné z předchozím, jen se liší v softwarovém zpracování. Nevýhodňuje se charakteristika, ale ostatní spektrofotometrické veličiny:

- Index podání barev
- Teplota chromatičnosti
- Souřadnice kolorimetrického diagramu (kolorimetrický trojúhelník)

Index podání barev určuje schopnost zdroje osvětlit věrohodně spektrum barev. Teplota chromatičnosti odpovídá teplotě ideálně tmavého tělesa vyzařujícího na stejné vlnové délce, jako měřený světelný zdroj. A kolorimetrický trojúhelník určuje barvu, tón, sytost atd. (viz. výše).

#### Zpracování:

Tab. 5: Výsledky měření souřadnic, teploty chromatičnosti a indexu podání barev

		souřadnice			T <sub>C</sub> [K]	Ra [-]
		x	y	z		
LED 5mm	bílá	0,301	0,318	0,381	7342,3	80,2
	zelená	0,099	0,518	0,383	12209,3	0,0
	modrá	0,144	0,057	0,799	1670,8	0,0
	žlutá	0,560	0,419	0,021	1797,4	0,0
	červená	0,675	0,319	0,006	3647,9	0,0
AUTO LED	bílá	0,446	0,444	0,110	3155,8	65,2
	zelená	0,161	0,636	0,203	8643,7	0,0
	modrá	0,142	0,055	0,803	1669,0	0,0
	žlutá	0,556	0,435	0,009	1912,2	0,0
	červená	0,647	0,312	0,041	3467,8	0,0
Žárovky	2,5V E10	0,478	0,420	0,102	2521,3	69,8
	12V E10	0,482	0,417	0,101	2453,4	95,4
	Halogen 5W	0,465	0,416	0,119	2659,1	92,3
	Halogen 10W	0,455	0,413	0,132	2793,2	90,4
	Halogen 20W	0,448	0,412	0,140	2887,7	90,0
Svítlidla	svítidlo 230V	0,413	0,419	0,167	3554,9	66,6
	svítidlo 12V	0,431	0,422	0,147	3253,2	60,1

**Vyhodnocení:**

Z teploty chromatičnosti lze poznat opět inkadescenční svítidla (cca 2700K). Teploty chromatičnosti jsou zaznačeny do kolorimetrického trojúhelníka, který je přidán do příloh. V trojúhelníku si lze všimnout, které svítidla vyzařují tzv. studenou a které teplou bílou. Žárovkové zdroje opisují křivku chromatičnosti černého zářiče shodně z teorií. Velice zajímavé je také umístění teploty chromatičnosti LED svítidla, která spočívá v blízkosti wolframových teplotních zářičů (3554,9 a dokonce 3253,2 K).

Index podání barev koresponduje z teorií. U monochromatických zdrojů sice byl ručně upraven na nulu ze záporných veličin. Výsledky dokazují, že inkadescenční zdroje mají stále vyšší kvalitu podání barev než svítidla a zdroje LED.

Barevný tón je přidán v příloze.



## **7 Návrh laboratorní úlohy na měření vybraných spektrofotometrických vlastností světelných zdrojů**

Potřeba praktické ukázky, získání zkušeností s měřením a vlastnostmi světelných zdrojů a osvojení schopností měřit z danými přístroji a zařízením jsou důvody k vytvoření ukázkové laboratorní úlohy k měření vybraných spektrofotometrických vlastností světelných zdrojů. Úloha je vytvořena pro měření a zpracování v laboratoři 02 budovy „L“ VŠB-TU Ostrava.

### **7.1 Zadání úlohy**

Změřte spektrální vlastnosti světelných zdrojů v kulovém integrátoru za pomoci přístrojů Luxmetr PU 550 a spektrofotometru AvaSpec od firmy Avantes. Vyhodnoťte.

#### **Úkoly**

1. Změřte a vypočtěte světelný tok předložených světelných zdrojů a svítidel pomocí kulového integrátoru a metody korekčního zdroje a světelného normálu. Výsledky porovnejte s údaji katalogů.
2. Změřte spektrální charakteristiky v kulovém integrátoru spektrofotometrem s kosinovým nástavcem. Zpracujte a vyhodnoťte grafické výstupy.
3. Změřte světelné veličiny: teplotu chromatičnosti, index podání barev a souřadnice kolorimetrického diagramu. Vyhodnoťte kvalitu zdrojů z hlediska barev.

### **7.2 Teoretický rozbor**

Spektrofotometrie používaná ve světelné technice vyhodnocuje vlastnosti světlené informace dopadající na sondu (snímač) přímo ze světelného zdroje popřípadě jeho osvětlovací působení (osvětlení, síla odrazu atd.) na okolí. Zatímco fotometrické výstupy v jiných oborech jsou spíše nakonec vyhodnoceny jako tíha, množství, složení (po stránce chemické) určitého prvku, tak ve světelné technice výstupy tvoří škála fotometrických veličin v čele s osvětleností a

barvou měřeného světla. Přesto se spektrofotometrie paradoxně používá nejmíň ve světelné technice. Spousta méně technicky náročnějších přístrojů dokáže totiž změřit zdánlivě dostačující informace o světelných zdrojích. Až vývoj mikroelektroniky v 90. letech v oblasti víceelementových optických detektorů jako jsou CCDA (Charged Coupled Devices Array) detektor a PDA (Photo Diode Array) detektor, umožňující konstrukce optických zařízení jako jsou levné scannery a kamery. Tyto detektory jsou dnes používány ke konstrukci rychlých, skenujících spektrometrů bez mechanicky pohyblivých disperzních elementů. Při použití opticky vodivých kabelů je možné snadno vytvářet modulární, snadno obměňovatelné a rychlé optické měřicí systémy, které efektivněji snímají a vyhodnocují světelnou informaci použitelnou pro návrhy osvětlených prostor, či svítidel samotných.

Spektrofotometr AvaSpec od Avantes je založen na použití detektorů CCD. Kabelové optické UV/VIS spektrometry Avantes tvoří optická lavice podle Czernyho-Turnera se standardním vstupem optickým kabelem, mřížkou pro žádaný spektrální rozsah, kolimačními zrcátky a víceelementovým detekčním polem. Spektrometr AvaSpec-2048 je vybaven CCD detektorem Sony ILX501 s lineárním polem 2048 elementů. Absolutní citlivost je 86 fotonů/impuls. Efektivní spektrální rozsah je 200-1100 nm. Měřicí aparatura se skládá z vlastního spektrometru a z řídicího PC. Spektrometr je složen optické soustavy se CCD detektorem a USB převodníku. Digitálně analogový převodník ADC-1000-USB (14 bitů, 1,33MHz) zajišťující komunikaci spektrometru s PC a transport dat, je k PC připojen přes rychlé USB rozhraní. Napájení je zajištěno transformovaným napětím ze sítě na 12 VDC, 160 mA.

Kulový integrátor je konstrukce, s níž lze měřit světelný tok pomocí normálu světelného toku a také osvětlenost, kterou ze světelného toku a známého průměru integrátoru lze dopočítat. Integrátor může mít tvar krychle nebo kvádra, ale nejvhodnější (zvláště při nesymetrickém rozdělení světelného toku) jsou integrátory ve tvaru koule. Na vnitřním povrchu je kulový integrátor opatřenou bílým rozptylným nátěrem s vysokým činitelem odrazu. Důležitým požadavkem je, aby byl nátěr barevně neselektivní. Nejlépe vyhovují některé druhy běloby zinkové, titanové či barytové. Často bývá základní nátěr trvalý a na něj je nanesen nátěr rozpustný ve vodě, který se pravidelně obnovuje. Činitel odrazu by měl být v mezích 0,75 až 0,85. Koule má na jedné straně okénko s fotoclánkem zastíněné clonkou, aby na něj nedopadalo světlo přímo ze zdroje. Zdroj je zavěšen přibližně ve středu koule. Při rozsvícení zdroje uvnitř koule vznikají mnohonásobné odrazy na vnitřním povrchu koule. S ohledem na difuzní

charakter vnitřního povrchu integrátoru je teoreticky výsledná osvětlenost ve všech bodech vnitřního povrchu koule stejná a její hodnota se měří fotočlánkem.

### 7.2.1 Měření světelného toku

Připravte měřicí soustavu. Konstrukci kulového integrátoru opatřete redukčním kroužkem pro uchycení sondy luxmetru. Luxmetr PU 550 zapněte a jeho sondu zastrčte do otvoru v integrátoru. Postupně každý zdroj zapojte do patice (ta je potřeba pro rozdílné zdroje měnit), koule uzavřete, daný světelný zdroj rozsviňte a na luxmetru odečtěte hodnotu osvětlenosti. Poté zhasněte měřený zdroj a rozsviňte korekční žárovku. Odečtěte hodnotu na luxmetru. U každého měření, dle potřeby, vyčkejte doby plného světelného toku tzv. doby ustálení. Proveďte i měření s normálem světelného toku.

Vztah pro výpočet světelného toku:

$$\phi_x = \phi_N \frac{E_x \cdot E_{KN}}{E_N \cdot E_{Kx}} \quad (\text{lm; lm, lx, lx, lx, lx})$$

$E_N$  ... osvětlenost při rozsvíceném normálu a zhasnutém korekčním zdroji

$E_{KN}$  ... osvětlenost při zhasnutém normálu a rozsvíceném korekčním zdroji

$E_{Kx}$  ... osvětlenost při zhasnutém měřeném zdroji a rozsvíceném korekčním zdroji

$E_x$  ... osvětlenost při rozsvíceném měřeném zdroji a zhasnutém korekčním zdroji.

$\Phi_N$  ... světelný tok normálu

### 7.2.2 Měření spektrálních charakteristik

Kulový integrátor opatřete redukčním kroužkem pro sondu spektrofotometru. Přístroj AvaSpec připojte do sítě, a přes USB i k počítači. Do předního panelu zapojte optické vlákno s nasazeným kosinovým nástavcem. Sondu s nástavcem zastrčte do otvoru koule. Dále je postup

shodný z předchozím měřením. Jen se nepoužívá korekční žárovka a zpracování probíhá na počítači.

Spustěte aplikaci AvaSoft 7.4 a vytvořte nový experiment. Vypněte všechna svítidla v místnosti a spustěte měření (Start). Po ustálení průběhu měření pozastavte a uložte temnou složku (Dark Data). Rozsviňte zdroj a spustěte měření. Pro vyhlazení průběhu odfiltrujte temná data (Setup > Subtract Saved Dark). Pokud průběh dosáhl saturace a nebo nelze pro nízké hodnoty odečíst, je třeba změnit integrační čas. Pokaždé změně integračního času je třeba opět změřit a uložit temné data. Po vykreslení grafu lze editovat osy (jejich rozsah), provést tisk a nebo konvertovat grafický výstup. Experiment uložte.

### **7.2.3 Měření indexu podání barev, teploty chromatičnosti a kolorimetrického trojúhelníku**

Při posledním měření zůstává sestava ve stejném stavu, jako při předchozím. Opět měníme předložené zdroje. Spustěte aplikaci AvaSoft 7.4 a dále protokol pro měření světelných veličin (Application > Absolute Irradiance Application). V první záložce načtete uložený kalibrační zdroj (DeuteriumHalogen), v další použitý hardware (CC-UV/VIS – kosinův nástavec) a vyberte zobrazení veličin (stačí zaškrtnout Colorimetry a Photometry). Stiskněte OK. Spustěte měření a po ustálení veličin pozastavte. Odečtěte veličiny a uložte. U všech měření dbejte správné hladině napětí a proudu dodávaného do zdroje.

## **7.3 Zpracování a vyhodnocení**

Zpracování proved'te pomocí grafů a tabulek. Použijte MS Office. Vyhodnocení zpracujete pro každý úkol zvlášť a nakonec vypracujete závěr s hodnocením měření, který bude obsahovat popis možností měření spektrálních vlastností a světelného toku v kulovém integrátoru.

## Závěr

Jedním z cílů této práce byl návrh a popis výroby kulového integrátoru. Tento problém je kompletně řešen v kapitole 5 Ulbrichtova koule (kulový integrátor). Právě v této kapitole je zachycen proces výroby konstrukce integrátoru pro laboratoř, ve které mělo probíhat měření. Kulový integrátor byl kompletně navrhnut a sestrojen pouze z polotovarů. Koule byla opatřena nátěrem dle normy, doplněna o nutné vybavení, možnost uchycení a připojitelnosti měřených zdrojů a měřících přístrojů.

Druhým cílem práce bylo vytvoření laboratorní úlohy pro ukázkové měření s kulovým integrátorem. Tato úloha měla být používána jako učební úloha ve světelných laboratořích. Její zadání a postup k vypracování obsahuje kapitola 7 Návrh laboratorní úlohy na měření vybraných spektrofotometrických vlastností světelných zdrojů.

Měření těchto vybraných spektrofotometrických vlastností dokazuje, že lze světelnou laboratoř připravit na rozvoj v oblasti světelných zdrojů. Tendence vývoje ve světelné technice roste. Od toho se vyvíjí i zmenšující se rozměry a stoupající měrné výkony. Je tedy zapotřebí vybavit měřící pracoviště. A tato práce dokazuje, že konstrukce kulového integrátoru (40 cm) vyhovuje požadavkům k měření nových světelných zdrojů a svítidel.

Ve výsledných měřeních se objevila LED svítidla, která by měla nadále sloužit jako hlavní předmět k měření v integrátoru. V dnešní době existuje rozličná nabídka těchto svítidel na trhu, a jejich výrobci by tedy mohli využívat konstrukci kulového integrátoru v laboratoři VŠB-TU Ostrava pro kontrolní měření.

## Seznam literatury

- [1] Sokanský K., *Elektrické světlo a teplo*, Skripta VŠB – TU Ostrava, 1990
- [2] Sokanský K. a kolektiv, *Racionalizace v osvětlování venkovních prostor*, Česká společnost pro osvětlování regionální skupina Ostrava, Ostrava, 2005
- [3] Habel J., *Základy světelné techniky (4)*, Světlo – časopis pro světelnou techniku a osvětlování č.4, FCC Public s. r. o., Praha, 2009
- [4] Habel J., *Základy světelné techniky (5)*, Světlo – časopis pro světelnou techniku a osvětlování č. 5, FCC Public s. r. o., Praha, 2009
- [5] Habel J., *Základy světelné techniky (5)*, Světlo – časopis pro světelnou techniku a osvětlování č. 6, FCC Public s. r. o., Praha, 2009
- [6] Novák T., *Posouzení současných možností výkonových světelných diod (LED - Light Emitting Diode) pro Třinecké železářny*, Ostrava, 2010
- [7] Wikipedie, *Barevný prostor CIE 1931*, [online], URL:  
<<http://panwiki.panska.cz/index.php/Soubor:CIExy1931.png>> [cit 15.3.2010]
- [8] Otáhalová L., *Popis barev a základy barvových prostorů*, [online], URL:  
<<http://www.reprodukce-barev.org/?menu=3>> [cit 23.3.2010]
- [9] Zmeškal O., Čeppan M., Dzik P., *Barevné prostory a správa barev*, [online], URL:  
<[http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download/stud06\\_rozn02.pdf](http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download/stud06_rozn02.pdf)> [cit 23.3.2010]
- [10] Sokanský K. a kolektiv, *Dominantní vlivy ovlivňující spotřebu elektrické energie osvětlovacích soustav*, Česká energetická agentura, Ostrava, 2007
- [11] ČSN 36 0010, *Nátěr fotometrického integrátoru a jeho příprava*,
- [12] HunterLab, *CIE  $L^*a^*b^*$  Color Scale*, Reston, 2008 [online], URL:  
<[http://www.hunterlab.com/appnotes/an07\\_96a.pdf](http://www.hunterlab.com/appnotes/an07_96a.pdf)> [cit 10.1.2010]
- [13] Wikipedie, *Color rendering index*, [online], URL:  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Colour\\_rendering\\_index](http://en.wikipedia.org/wiki/Colour_rendering_index)> [cit 16.3.2010]
- [14] Černotík O., *Záření černého tělesa poprvé*, [online], URL:  
<<http://cernotik.blog.idnes.cz/c/132574/Nobelova-cena-11-Zareni-cerneho-telesa-poprve.html>> [cit 22.4.2010]
- [15] Řezanka P., *Spektrofotometrie ve viditelné oblasti spektra*, [online], URL:  
<<http://www.chemweb.estranky.cz/clanky/ksicht---serial/spektrofotometrie-ve-viditelne-oblasti-spektra>> [cit 8.4.2008]

- [16] Řezanka P., *Hmotnostní spektrometrie*, [online], URL:  
<[http://www.chemweb.estranky.cz/clanky/ksicht---serial/hmotnostni-spektrometrie-\\_ms\\_](http://www.chemweb.estranky.cz/clanky/ksicht---serial/hmotnostni-spektrometrie-_ms_)> [cit 8.4.2008]
- [17] Avantes, *Operating manual*, 2006

## Seznam příloh

### Příloha č. 1: Tabulka měření

Tabulka 1: Kompletní vyhodnocení měření v kulovém integrátoru

### Příloha č. 2: Grafické zpracování

- Graf 1: Spektrální charakteristika zdroje LED 5mm BÍLÁ
- Graf 2: Spektrální charakteristika zdroje LED 5mm ZELENÁ
- Graf 3: Spektrální charakteristika zdroje LED 5mm MODRÁ
- Graf 4: Spektrální charakteristika zdroje LED 5mm ŽLUTÁ
- Graf 5: Spektrální charakteristika zdroje LED 5mm ČERVENÁ
- Graf 6: Spektrální charakteristika zdroje Auto LED BÍLÁ
- Graf 7: Spektrální charakteristika zdroje Auto LED ZELENÁ
- Graf 8: Spektrální charakteristika zdroje Auto LED MODRÁ
- Graf 9: Spektrální charakteristika zdroje Auto LED ŽLUTÁ
- Graf 10: Spektrální charakteristika zdroje Auto LED ČERVENÁ
- Graf 11: Spektrální charakteristika zdroje Žárovka E10-2,5V
- Graf 12: Spektrální charakteristika zdroje Žárovka E10-12V
- Graf 13: Spektrální charakteristika zdroje Halogenová žárovka 12V-5W
- Graf 14: Spektrální charakteristika zdroje Halogenová žárovka 12V-10W
- Graf 15: Spektrální charakteristika zdroje Halogenová žárovka 12V-20W
- Graf 16: Spektrální charakteristika svítidla OF-SMD3528WW (230V)
- Graf 17: Spektrální charakteristika svítidla 3VAC9CW3 (12V)

### Příloha č. 3: Teplota chromatičnosti

Kolorimetrický trojúhelník s vyznačenou teplotou chromatičnosti světelných zdrojů.



**Příloha č. 4: Katalogové listy výrobků**

Katalogový list 1: LED 5mm

Katalogový list 2: Auto LED

Katalogový list 3: Žárovky

Katalogový list 4: Halogenové žárovky 12V

Katalogový list 5: Svítidlo OF-SMD3528WW (Datasheet)

Katalogový list 6: Svítidlo 3VAC9CW3 (Datasheet)

**Příloha č. 5: Výkresová dokumentace návrhu kulového integrátoru**

Polokoule kulového integrátoru

Redukční kroužek 1

Redukční kroužek 2

Redukční kroužek 3

Clona 1

Clona 2

Distanční trubice

**Příloha č. 6: Návod na obsluhu AvaSpec-2048**

AvaSpec-2048 Fiber Optic Spektrometer - manuál pro měření a kalibraci

**Příloha č. 7: Norma**

Výňatek z normy ČSN 36 0010